

УДК 550.382

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И СИНТЕТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ: ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОБЛУЧЕНИЙ ВНЕЗЕМНОГО ВЕЩЕСТВА В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

© 2015 г. Н. С. Безаева^{1,2,3}, Ж. Гаттаччека^{1,4}, П. Рошетт¹, Ж. Дюпра⁵, Ж. Рицца⁶, П. Вернацца⁷, В. И. Трухин⁸, А. Я. Скрипник⁹

¹Лаборатория СЕРЕЖ НЦНИ/Университет Экс-Марсель, г. Экс-ан-Прованс, Франция

E-mail: bezaeva@physics.msu.ru; gattaccesa@cerege.fr; rochette@cerege.fr

²Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

³Казанский Федеральный Университет, г. Казань, Россия

⁴Факультет наук о Земле, Атмосфере и Планетах Массачусетского Технологического Института, г. Кембридж, США

⁵Центр Ядерной Спектрометрии и Масс-спектрометрии, ИН2ПЗ-НЦНИ, Университет Пари-Сюд, г. Орсе, Франция

E-mail: Jean.Duprat@csnsm.in2p3.fr

⁶Лаборатория Облучения твердых тел, Политехническая Школа/СЕА (ДСМ-ДРЕСАМ)/НЦНИ, г. Палезо, Франция

E-mail: giancarlo.rizza@polytechnique.edu

⁷Лаборатория Астрофизики г. Марсель, г. Марсель, Франция

E-mail: pierre.vernazza@oamp.fr

⁸Физический факультет МГУ им. Ломоносова, г. Москва

E-mail: trukhin@physics.msu.ru

⁹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

E-mail: skripnik@geokhi.ru

Поступила в редакцию 20.11.2013 г.

В работе приведены результаты лабораторных экспериментов по облучению образцов, проведенных с целью оценки возможного воздействия солнечных космических лучей (или солнечных энергетических частиц — SEP) и галактических космических лучей (GCR) на магнитные свойства внеземного вещества. Проведены эксперименты по облучению протонами (с энергиями облучения $E_1 = 400$ кэВ, $E_2 = 850$ кэВ и тремя дозами облучения в диапазоне $10^{14} - 10^{16}$ p/cm²) и ионами свинца ($E = 1$ ГэВ) на (ранее размагниченных переменным магнитным полем с амплитудой 120 мТл) образцах горных пород и синтетических образцах со следующими магнитными носителями: металлическое железо, никелистое железо, магнетит, титаномагнетит, пирротин. В зависимости от магнитной минералогии и типа облучения, процессы облучения приводят либо к дальнейшему размагничиванию, либо к намагничиванию облученных образцов. Помимо образования радиационной остаточной намагниченности (RIRM), наблюдаются значительные изменения в магнитных свойствах облученных образцов, например, от умеренного до резкого снижения (до 93%) остаточной коэрцитивной силы B_{cr} для всех железосодержащих образцов (образцы порошкового железа α — Fe в эпоксидной смоле и образцы обыкновенного хондрита *Bensour*). В отличие от железосодержащих образцов, некоторые магнетитсодержащие образцы испытали радиационно-индуцированное повышение магнитной жесткости (увеличение B_{cr}). Увеличение магнитной жесткости наблюдалось также при облучении FeNi-содержащих образцов метеоритов HED ионами аргона Ar²⁺, проведенном для сравнения с результатами предыдущих экспериментов. Таким образом, совокупный эффект воздействия SEP и GCR может привести к уменьшению магнитной жесткости железосодержащих материалов и увеличению магнитной жесткости магнетитсодержащих материалов внеземного вещества. Для ответа на вопрос о возможном вкладе RIRM в естественную остаточную намагниченность метеоритов и образцов Лунного грунта, требуется дальнейшее изучение физического механизма образования RIRM, а также потенциальной зависимости интенсивности RIRM от величины напряженности магнитного поля в зоне облучения.

Ключевые слова: космическая радиация, облучения, протоны, ионы свинца, ионы аргона, магнитные свойства горных пород, метеориты, внеземное вещество.

DOI: 10.7868/S0002333715020015

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть внеземного вещества подвергалась облучению в космическом пространстве на разных этапах своей эволюции еще до попадания на Землю через выпадение метеоритов или возвращение проб вещества космическими экспедициями. В Солнечной системе существует три основных типа облучения: 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*”) [Diehl et al., 2001] и периодические интенсивные потоки частиц солнечных вспышек, которые еще называют солнечные космические лучи или солнечные энергетические частицы (далее SEP от англ. “*solar energetic particles*”) [Heiken et al., 1991; Eugster et al., 2006]. Интенсивность потоков SEP, инжектируемых солнцем во время солнечных вспышек, напрямую связана с одиннадцатилетними циклами солнечной активности. Интенсивность потоков GCR во внутренней части солнечной системы изменяется в два раза в течение одиннадцатилетнего солнечного цикла и достигает своего максимума в период минимума солнечной активности в результате модуляции корональной полости.

Радиационные явления в космическом пространстве вносят значительный вклад в эволюцию поверхности безвоздушных тел солнечной системы. Ионизирующее облучение SW изменяет дистанционно зондируемые свойства поверхностей безвоздушных тел солнечной системы, что может препятствовать возможности дистанционной оценки минералогии и других характеристик как поверхности астероидов, так и других безвоздушных тел [Vernazza et al., 2008; 2009]. Спектральные эффекты, связанные с непрерывной бомбардировкой ионами SW, были ранее изучены в лабораторных экспериментах с целью объяснить наблюдаемое спектральное несоответствие между Лунным грунтом и подстилающими породами, а также между наиболее распространенным классом метеоритов, обыкновенные хондриты, и спектрами с поверхности их предполагаемых родительских тел (астероиды S-типа) [Pieters et al., 2000; Hapke, 2001; Brunetto, Strazzulla, 2005; Strazzulla et al., 2005; Vernazza et al., 2006]. Эти эксперименты показывают, что космическое выветривание может быть причиной наблюдаемого несоответствия спектров.

В настоящей работе экспериментально исследуется гипотеза о возможном влиянии космической радиации на магнитные свойства твердого вещества Солнечной системы. Влиянием SW (с типичными энергиями E порядка 1 кэВ/а. е. м., где эВ/а. е. м. — электрон-вольт на атомную единицу массы) можно пренебречь ввиду того, что

соответствующая глубина проникновения SW лежит в нанометровом диапазоне, а значит влияние SW на объемные магнитные свойства не будет обнаружимо как в условиях лабораторных экспериментов, так и в космическом пространстве. Поэтому далее будут рассматриваться только SEP и GCR.

Для лабораторного моделирования SEP (нижняя часть диапазона энергий: $E_p \sim 1$ МэВ) были проведены эксперименты по протонной бомбардировке образцов. Для лабораторного моделирования GCR были проведены эксперименты по облучению образцов ионами свинца с энергией $E = 1$ ГэВ или ~ 5 МэВ/а. е. м. Были также проведены эксперименты по облучению образцов ионами аргона с энергией $E = 400$ кэВ (~ 10 кэВ/а. е. м.). В настоящей работе приводятся результаты влияния протонной и ионной бомбардировки на магнитные свойства горных пород, метеоритов и синтетических образцов разной магнитной минералогии (металлическое железо и никелистое железо, магнетит, титаномагнетит, пирротин). До сих пор этот вопрос оставался малоизученным [Butler, Cox, 1971, 1974; Rowe, 1978], несмотря на ряд потенциально важных приложений, в частности, интерпретация магнитных свойств и палеомагнитного сигнала метеоритов в свете понимания эволюции ранней солнечной системы и твердых тел в солнечной системе [Rochette et al., 2009a; Weiss et al., 2010].

2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ГЛОБАЛЬНЫЙ КОНТЕКСТ

Согласно одноступенчатой модели облучения [Herzog, 2005], метеороиды в составе родительских тел защищены от космической радиации до момента фрагментации. Время экспозиции внеземного вещества в космическом пространстве (*cosmic ray exposure age*) может быть оценено для разных типов метеоритов по обилию в метеоритах некоторых нуклидов, образовавшихся при их взаимодействии с космическими лучами. После фрагментации в результате действия импактного механизма и до входа в атмосферу Земли, метеороиды подвергаются прямому облучению SEP и GCR в течении периодов времени порядка нескольких миллионов лет [Sears, 2004]. Космические лучи состоят в основном из протонов (p) и ядер гелия (He) с типичными отношениями $He/p \sim 0.1$ и ~ 0.02 для GCR и SEP, соответственно [Капитонов, 2002]. Поток более тяжелых ионов (с атомным номером $Z \geq 6$) составляет в GCR $\sim 1\%$ [Капитонов, 2002].

На сегодняшний день интенсивность (флюенс Φ) потоков протонов составляет $\Phi_{SEP} \sim 100 p/cm^2$ с (p с энергиями $E > 10$ МэВ) для SEP и $\Phi_{GCR} \sim 3 p/cm^2$ с для GCR [Heiken et al., 1991]. Глубина проникновения протонов в твердое веще-

ство варьируется от микрометров до миллиметров для SEP протонов (E от ~ 1 МэВ/а. е. м. до десятков МэВ/а. е. м.) и от сантиметров до метров для GCR протонов (E от 0.1 до >10 ГэВ/а. е. м.). Взаимодействие ядер GCR с твердым веществом вызывает ядерные реакции в веществе, которые сопровождаются образованием вторичных нейтронов.

В предыдущих работах было показано, что нейтронная бомбардировка может приводить как к магнитному упорядочению монокристалла никелистого железа [Néel et al., 1964], так и к увеличению магнитной жесткости (*magnetic hardening*) камасита (сплав FeNi с <5 –6 мас. % Ni и объемно-центрированной кубической решеткой) и железа [Butler, Cox, 1971; 1974]. Однако вторичные нейтроны мало влияют на метеориты ввиду малого эффективного поперечного сечения ядерной реакции — источника вторичных нейтронов [Eugster et al., 2006].

Известно, что в результате процессов абляции и фрагментации метеороидов при их прохождении через атмосферу Земли, масса выпавших метеоритов намного меньше соответствующей внеатмосферной массы метеороидов [Бронштэн, 1981]. Абляция (A) — это потеря массы метеороидом в результате плавления наружных слоев и последующего сдувания жидкой пленки набегающим воздушным потоком, а также испарения вещества и его удаления в виде паров [Бронштэн, 1981]. A можно представить следующим образом:

$$A(\%) = (1 - m/M) \times 100, \quad (1)$$

где m — выпавшая (найденная) масса метеорита, M — внеатмосферная масса метеороида. Эффективность абляции в основном зависит от M и внеатмосферной скорости метеороида V_e ($V_e \in [11.2, 72.8]$ км/с, но на практике $V_e \leq 30$ км/с [Ceplecha et al., 1998]), а также его формы и скорости в точке траектории, где абляция прекращается, и метеороид переходит в режим темного полета (*dark-flight*) со скоростью, постепенно приближающейся к режиму свободного падения [Ceplecha et al., 1998]. Существуют разные оценки A для разных типов метеоритов. Например, согласно работам [Алексеев, 2003; 2004], среднее значение A для хондритов составляет $91.5^{+2.1}_{-2.6}\%$ (определено для 262 хондритов), а для обыкновенных хондритов — $78.4^{+3.1}_{-3.4}\%$ (определено для 83 обыкновенных хондритов).

Таким образом, все следы облучения поверхности метеороида во время трансфера на Землю теряются при прохождении метеороида через атмосферу Земли из-за значительной потери массы метеоритного вещества. Однако влияние облучений SEP (протоны с энергиями порядка МэВ, проникающие на сотни микрометров или даже до сантиметров в случае наиболее энергетичных) на магнитные свойства внеземного вещества, веро-

ятно, может быть обнаружено на поверхностях твердых тел солнечной системы, а также в микрометеоритах, брекчированных метеоритах и реголите [Bischoff et al., 2006].

Кроме того, на ранней стадии эволюции, первоначальное внеземное вещество в форме пыли в протопланетном диске до аккреции было непосредственно подвержено, вероятно, интенсивному облучению в космическом пространстве. Исследование звезд до главной последовательности с массами 0.4–2 от массы солнца в рамках проекта *Chandra Orion Ultradeep Project* [Wolk et al., 2005] показывает, что для этих молодых звездных объектов жесткая рентгеновская светимость L варьируется в пределах 10^{30} – 10^{31} эрг/с [Preibisch, Feigelson, 2005]. Используя аналогию с импульсными вспышками, наблюдаемыми в настоящее время на солнце, авторы работы [Lee et al., 1998] получили коэффициент пересчета между L и кинетической энергией протонов с энергией >10 МэВ. Таким образом, можно оценить, что поток SEP на твердые тела в непосредственной близости к протосолнцу в первые миллионы лет был в 10^5 раз выше, чем современный поток SEP [Goswami et al., 2001; Feigelson et al., 2002], а именно порядка 10^7 p/cm² с.

Одним из важных последствий облучения внеземного вещества в космическом пространстве может быть изменение естественной остаточной намагниченности NRM (от англ. “Natural Remanent Magnetization”) облученного материала. Вопрос о возможности образования при облучении так называемой радиационно-индуцированной остаточной намагниченности RIRM (от англ. “Radiation Induced Remanent Magnetization”) впервые был поставлен в работе [Rowe, 1978], однако гипотеза RIRM до сих пор не имела экспериментального подтверждения. В настоящей работе эта гипотеза была проверена для случаев протонной и свинцово-ионной бомбардировок.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

3.1. Описание образцов

Эксперименты по протонному и ионному облучению были проведены на десяти различных типах образцов (имелось несколько образцов каждого типа, см. табл. 1) со следующими магнитными носителями: магнетит (Fe_3O_4), титаномагнетит ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$), металлическое железо (α — Fe) и никелистое железо (FeNi), а также пирротин (Fe_{1-x}S). Эти образцы состоят из двух земных горных пород, одного чистого минерала, четырех образцов дисперсного порошка (порошки синтетических железа и магнетита, а также природного моноклинного пирротина) в эпоксидной смоле и трех метеоритов.

Таблица 1. Основные магнитные свойства образцов до протонной и свинцово-ионной бомбардировок

Образец (магнитный носитель)	χ_0	$SIRM$	MDF_i	B_c	B_{cr}	B_{cr}/B_c	M_s	M_{rs}/M_s
Название образца								
<i>Микродиорит (магнетит)</i>								
1-1	274	0.75	9	2	24	12.0	34.6	0.02
1-2	257	0.83	8	3	28	9.3	33.8	0.02
1-3	117	0.45	9	3	34	11.3	17.6	0.02
1-a	782	1.77	8	2	17	8.5	90.9	0.01
<i>Базальт (титаномagnetит)</i>								
2-1	50.7	1.37	10	10	21	2.1	3.7	0.23
2-2	54.2	1.20	9	9	16	1.8	2.7	0.24
2-3	66.1	1.80	10	11	20	1.8	3.6	0.27
2-a	761	8.22	9	5	14	2.8	47.2	0.13
<i>Гексагональный пирротин</i>								
3-1	12.9	2.77	>150	217	—	—	1.3	0.48
3-2	9.2	1.83	>150	344	294	0.9	0.8	0.65
3-3	12.6	2.63	>150	152	—	—	2.3	0.31
3-a	18.6	4.31	>150	226	—	—	1.8	0.46
3-b	16.7	4.31	>150	184	166	0.9	2.2	0.52
<i>Моноклинный пирротин 1</i>								
4-1	32.0	1.56	9	11	20	1.8	5.9	0.23
4-2	28.4	1.63	8	12	21	1.8	5.5	0.23
4-3	25.3	1.64	8	12	22	1.8	4.8	0.23
4-a	67.7	3.90	8	10	16	1.6	13.5	0.26
<i>Моноклинный пирротин 2</i>								
5-1	28.9	2.71	13	16	25	1.6	7.3	0.34
5-2	24.0	2.41	12	18	27	1.5	6.3	0.34
5-3	32.2	3.13	11	16	24	1.5	8.1	0.35
5-a	44.6	5.25	12	15	22	1.5	12.3	0.37
<i>Железо в эпоксидной смоле</i>								
6-1	47.3	0.07	13	2	30	15.0	11.2	0.01
6-2	50.9	0.08	13	1	62	62.0	13.0	0.003
6-3	57.7	0.07	13	1	28	28.0	14.5	0.003
6-a	134	0.16	9	2	12	6.0	29.8	0.01
6-b	102	0.13	10	2	13	6.5	23.5	0.01
<i>Метеорит Boursour (FeNi)</i>								
7-1	3.7	0.04	17	6	56	9.3	1.2	0.02
7-2	3.9	0.04	11	5	50	10.0	1.4	0.02
7-3	34.1	0.15	5	3	55	18.3	10.2	0.01
7-a	190	0.21	16	1	30	30.0	63.2	0.003
<i>Магнетит в эпоксидной смоле</i>								
8-1	4.9	0.11	18	14	32	2.3	0.7	0.14
8-2	7.5	0.14	17	12	34	2.8	1.1	0.10
8-3	14.1	0.22	16	11	24	2.2	1.9	0.10
8-a	42.1	0.57	15	10	25	2.5	5.8	0.09

χ_0 — магнитная восприимчивость ($\text{в } \times 10^{-12} \text{ м}^3$); $SIRM$ — остаточная намагниченность насыщения, образованная в магнитном поле напряженностью 3 Тл (в мкАм^2), измеренная при использовании *2G SQUID* магнитометра; MDF_i — медианное поле разрушения $SIRM$ (в мТл); B_c и B_{cr} — коэрцитивная сила и остаточная коэрцитивная сила (в мТл), соответственно; M_s и M_{rs} — намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения (в мкАм^2), соответственно.

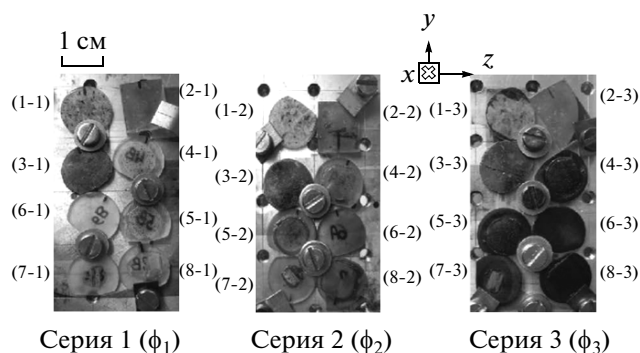


Рис. 1. Фотография образцов внутри ускорителя ARAMIS после окончания протонной бомбардировки. Каждый образец указан цифрами. Соответствие номеров конкретным образцам указано в табл. 1; {x, y, z} — система координат 2G SQUID магнитометра.

Два образца земных горных пород — это магнетитсодержащий микродиорит, описанный в работе [Gattaccesa et al., 2007], а также титаномагнетитсодержащий базальт, описанный в работе [Gattaccesa et al., 2008a]. Чистая минеральная фаза состоит из монокристаллов гексагонального пирротина (с небольшой примесью моноклинного пирротина)¹ и описана в работах [Carpenter, 1974; Rochette et al., 2003a]. Два порошковых образца — это моноклинный пирротин естественно-го происхождения, измельченный в порошок и равномерно диспергированный в эпоксидной смоле с размерами фракций в диапазонах 150–250 мкм и 75–100 мкм, которые далее называются моноклинный пирротин 1 и 2, соответственно (см. табл. 1). Исходный образец — источник порошка пирротина, описан в работе [Dekkers, 1988]. Два других порошкообразных образца — это образцы синтетических железа и магнетита с фракциями 10 мкм и <25 мкм, соответственно, которые были приготовлены при использовании коммерческих синтетических порошков, диспергированных в эпоксидной смоле. Изученные образцы метеоритов — это метеориты *Bensour* (обыкновенный хондрит LL6), *Bereba* (эвкрит), *Tatahouine* (диогенит). Последние два метеорита являются ахондритами клана HED (от англ. “Howardite-Eucrite-Diogenite”, Говардиты-Эвкриты-Диогениты), чьим родительским телом предположительно считают астероид Веста [Consolmagno, Drake, 1977; Binzel, Xu, 1993]. Магнитные свойства метеорита *Bensour* в основном определяются тетраэзитом [Gattaccesa et al., 2003]. Однако в настоящей работе образцы хондрита *Bensour* были нагреты до 650°C в атмосфере аргона до радиационных экспериментов с целью трансформации тетраэзита в тэнит (сплав FeNi с содержанием никеля Ni ≥ 7% и гра-

нецентрированной кубической решеткой — встречается во многих типах метеоритов [Sugiura et al., 1988; Rochette et al., 2003b; 2008; 2009b]). В магнитной минералогии метеоритов *Tatahouine* и *Bereba* преобладает низконикелистое железо в форме камасита [Rochette et al., 2009b].

Образцы базальта, использованные в экспериментах по протонной бомбардировке, были получены из стандартного тонкого шлифа (толщиной 30 мкм). Остальные образцы имели толщину от 20 до 50 мкм и были наклеены на более толстые диски из эпоксидной смолы для облегчения лабораторных манипуляций (рис. 1). В экспериментах по облучению ионами свинца толщина образцов составляла 300 мкм. Все образцы были изготовлены при использовании пилы с алмазной ниткой с последующим использованием наждачной и шлифовальной бумаги для ручного шлифования. Основные магнитные свойства исследованных образцов до облучения представлены в табл. 1.

Образцы имеют нумерацию от 1 до 8 (каждый номер соответствует отдельной литологии или минералогии). В случае протонной бомбардировки были использованы три идентичные группы образцов и три разные дозы облучения (флюенса) ϕ ($\phi_1 < \phi_2 < \phi_3$) в диапазоне от $\phi_1 = 1.2 \times 10^{14}$ p/cm² до $\phi_3 = 10^{16}$ p/cm² (см. ниже, раздел 3.2). Названия образцов состоят из номера образца (от 1 до 8), за которым следуют цифры 1, 2 или 3 для случаев ϕ_1 , ϕ_2 или ϕ_3 , соответственно (см. табл. 1, рис. 1). В случае свинцово-ионной бомбардировки использовался только один флюенс. Для этих экспериментов в названиях образцов за первой цифрой следуют буквы “a” или “b” (в случае двух облученных образцов). Три добавочных образца были приготовлены для дополнительных экспериментов (см. ниже): образец порошкового железа в эпоксидной смоле 6-4 и образцы гексагонального пирротина 3-4 ($m = 36.5$ мг) и 3-5 ($m = 21.7$ мг).

Радиационные эксперименты с ионами аргона (Ar²⁺) были проведены только на образцах метеоритов *Bereba* и *Tatahouine*. Экспериментальный протокол описан в работах [Vernazza et al., 2006; Fulvio et al., 2012]. Оба образца были в форме таблеток, полученных с помощью напрессовывания первоначальной метеоритной пудры (2 тонны, 5–10 с) фракцией 10–100 мкм на опорный немагнитный диск (из KBr). Мы изучили магнитные свойства девяти необлученных (в лабораторных условиях) фрагментов метеорита *Tatahouine* с целью проверить уровень однородности первоначальных магнитных свойств в масштабе ~0.1 г. Для сравнения мы также изучили один необлученный образец метеорита *Bereba* в виде таблетки из прессованной пудры.

¹ Далее в тексте статьи этот образец для краткости называется “гексагональный пирротин”.

3.2. Методика радиационных экспериментов

Протонная бомбардировка образцов была проведена с использованием ускорителя *ARAMIS* [Bernas et al., 1992] — части экспериментального комплекса *JANNus* [Serruys et al., 2005] в Центре Ядерной Спектрометрии и Масс-спектрометрии г. Орсе, Франция (*CSNSM, Orsay, France*). Мы использовали три разные дозы протонного облучения (общий флюенс $\phi_1 = 1.2 \times 10^{14}$ p/cm², $\phi_2 = 1.2 \times 10^{15}$ p/cm² и $\phi_3 = 10^{16}$ p/cm²) на трех идентичных группах образцов. Характерная интенсивность пучка составляла $I_p = 1\text{--}3$ мкА (в вакууме $<4 \times 10^{-6}$ мбар), а время экспозиции варьировалось от нескольких минут для минимальной дозы облучения (ϕ_1) до нескольких часов для максимальной дозы облучения (ϕ_3)². До протонной бомбардировки на все образцы был напылен тонкий слой углерода ($15 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$). На основании значений энергии облучения и плотности материалов и при использовании программы *SRIM* [Ziegler, 2004] была оценена максимальная глубина проникновения протонов в образцы: 15–20 мкм. Для увеличения амплитуды возможных радиационно-индуцированных изменений за счет создания нескольких слоев радиационно-индуцированных дефектов с разной глубиной залегания мы облучили все образцы (с вышеуказанными флюенсами) дважды: с энергиями облучения $E_1 = 400$ кэВ и $E_2 = 850$ кэВ, соответственно. Потоки протонов таких энергий не вызывают ядерных реакций в облученных образцах.

Облучение ионами свинца с энергией облучения $E = 1$ ГэВ (~ 5 МэВ/а. е. м.) было проведено при использовании Большого Национального Ускорителя тяжелых ионов в г. Каен, Франция (*GANIL, Caen, France*). При использовании программы *SRIM* [Ziegler, 2004] была оценена соответствующая максимальная глубина проникновения ионов в вещество: 200 мкм. До проведения ионной бомбардировки все образцы закрыли алюминиевой фольгой. Протонная и ионная бомбардировки не привели к потере массы или механическому разрушению образцов (см. табл. 2).

Облучение образцов ионами аргона Ar^{2+} было проведено ранее коллективом автором (Вернацца и др.) в Астрофизической Обсерватории г. Катания, Италия (*Osservatorio Astrofisico di Catania, Italy*) (описание экспериментальной установки изложено в работе [Vernazza et al., 2006]). Использо-

ванные флюенс и энергия облучения составляли 6.6×10^{15} Ar^{2+} /см² и 400 кэВ, соответственно. Во всех экспериментах толщина образцов превышала максимальную глубину проникновения протонов и ионов. Таким образом, бомбардирующие частицы оставались имплантированными в материал мишени.

3.3. Методика магнитных измерений

Все магнитные измерения были проведены в лаборатории *CEPEJ*, г. Экс-ан-Прованс, Франция (*CEREGE, Aix-en-Provence, France*). В случае экспериментов по протонному и свинцово-ионному облучению, магнитные анализы до и после облучения проводились на одних и тех же образцах. В случае облучения ионами аргона, магнитные анализы проводились на облученных образцах и других необлученных (в лабораторных условиях) образцах тех же метеоритов для сравнения.

Ниже приводится стандартная последовательность измерений. Все измерения были проведены дважды: до и после облучения. Сначала измерялась пред- или пострадиационная остаточная намагниченность, после чего образцы пошагово размагничивались переменным магнитным полем *AF* (от англ. “*Alternating Field*”) с амплитудой до 150 мТл при использовании СКВИД магнитометра компании *2G Enterprises* (далее *2G SQUID магнитометр*), оснащенного встроенной размагничивающей установкой и позволяющего измерять магнитный момент вплоть до 10^{-4} Ам² с уровнем шума порядка 10^{-11} Ам². Измерения петель гистерезиса при комнатной температуре были проведены при использовании вибрационного магнитометра *Princeton VSM* (от англ. “*Vibrating Sample Magnetometer*”) с максимальным магнитным полем 1 Тл и чувствительностью $\sim 10^{-9}$ Ам². При анализе петель гистерезиса получались значения остаточной намагниченности насыщения ($M_{\text{тс}}$), намагниченности насыщения (M_s) и коэрцитивной силы (B_c). Значения остаточной коэрцитивной силы ($B_{\text{ср}}$) определялись при пошаговом размагничивании $M_{\text{тс}}$ в обратном магнитном поле (*back-field remanence demagnetization experiments*), проведенном также при использовании *Princeton VSM*. Измерения магнитной восприимчивости в слабых полях χ_0 проводились при использовании капнометров *KLY2* и *MFK1* производства *Agico*. На каждом образце создавалась остаточная намагниченность насыщения *SIRM* (от англ. “*Saturation Isothermal Remanent Magnetization*”)³ в магнитном поле 3 Тл при использовании импульсного намагничивающего устройства

² Во время протонной бомбардировки напряженность магнитного поля B в зоне облучения не измерялась. Статическое магнитное поле в камере ускорителя на уровне образцов, измеренное после окончания экспериментов при атмосферном давлении и комнатной температуре при использовании *fluxgate* магнитометра *MAG-01* производства *Bartington Instruments* с чувствительностью 1 нТл, составило $B = 146$ мкТл.

³ В настоящей работе всегда фактически измерялся магнитный момент образцов. Для возможности использования стандартных сокращений далее вместо *магнитного момента* используется *намагниченность*.

Таблица 2. Относительные изменения в объемных магнитных свойствах образцов после протонной и свинцово-ионной бомбардировок

Образец (магнитный носитель)	$ \Delta m $	$\Delta\chi_0$	$\Delta SIRM$	ΔMDF_i	ΔB_c	ΔB_{cr}	ΔM_s
Название образца							
<i>Микродиорит (магнетит)</i>							
1-1	0.1	1	−2	−1	3	15	9
1-2	0.0	1	−3	−5	−9	−1	5
1-3	0.2	2	−6	−5	2	−11	1
1-a	—	−6	8	4	25	17	−4
<i>Базальт (титаномагнетит)</i>							
2-1	0.1	−4	−11	0	−1	−4	−4
2-2	0.2	−4	−21	−5	−1	0	36
2-3	0.0	−2	−20	−2	−7	−1	−5
2-a	—	−15	−6	−6	4	−3	−2
<i>Гексагональный пирротин</i>							
3-1	0.1	−3	−16	—*	0	—	9
3-2	0.0	−5	−19	—*	5	−17	9
3-3	0.4	−4	−9	—*	4	—	−1
3-a	—	15	6	—**	−25	—	−5
3-b	—	6	−1	—**	−12	3	0
<i>Моноклинный пирротин 1</i>							
4-1	0.2	−2	1	−7	2	2	−3
4-2	0.1	1	2	1	−2	−3	22
4-3	0.4	−5	2	0	0	−2	−4
4-a	—	13	−6	−4	0	2	−2
<i>Моноклинный пирротин 2</i>							
5-1	0.1	−5	1	2	3	−1	−16
5-2	0.2	−6	0	−1	0	−5	−16
5-3	0.5	4	0	1	−1	−2	−2
5-a	—	19	−12	−3	−2	0	10
<i>Железо в эпоксидной смоле</i>							
6-1	0.1	1	−20	−24	−27	−76	3
6-2	0.0	−1	−17	−17	−29	−90	−5
6-3	0.8	−2	−23	−23	−29	−63	−3
6-a	—	−3	14	4	2	−58	11
6-b	—	−3	3	0	−12	−2	12
<i>Метеорит Bensour (FeNi)</i>							
7-1	0.1	16	−16	−29	40	−53	−1
7-2	0.1	−7	−34	−19	−6	−93	−2
7-3	0.1	−1	−7	−4	10	−66	3
7-a	—	0.2	37	−15	25	−6	−2
<i>Магнетит в эпоксидной смоле</i>							
8-1	0.0	−8	−20	−13	−9	−4	−7
8-2	0.6	−38	30	15	−3	−8	−22
8-3	0.7	3	−16	−13	−6	23	−19
8-a	—	−29	−16	9	11	21	−33

Все величины указаны в %. Относительные изменения были подсчитаны для каждого параметра A при использовании следующей формулы: $\Delta A = (A_2 - A_1)/A_1 \times 100\%$, где A_1 и A_2 — соответствующие пред- и пострadiационные значения, соответственно. Таким образом, отрицательные и положительные ΔA указывают на протон-индуцированное уменьшение и увеличение величины A , соответственно. m — масса образца; χ_0 — магнитная восприимчивость; $SIRM$ — остаточная намагниченность насыщения, полученная в магнитном поле напряженностью 3 Тл и измеренная при использовании *2G SQUID* магнитометра; MDF_i — медианное поле разрушения SIRM; B_c и B_{cr} — коэрцитивная сила и остаточная коэрцитивная сила, соответственно; M_s и M_{rs} — намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения, соответственно.

* Пострadiационное значение MDF_i попадало в диапазон [147, 150] мТл; предрadiационное значение $MDF_i > 150$ мТл.

** Пред- и пострadiационные значения $MDF_i > 150$ мТл.

MPPM9 производства *Magnetic Measurements*. В заключение, SIRM измерялась и подвергалась ступенчатому размагничиванию переменным магнитным полем с максимальной амплитудой 150 мТл. Оставшаяся после АФ чистки остаточная намагниченность (до облучений) в дальнейшем обозначается I_{r0} (в случае протонной бомбардировки I_{r0} соответствует остаточной намагниченности, оставшейся после дополнительного шага — повторного создания SIRM с последующей одношаговой полевой чисткой переменным магнитным полем с амплитудой 120 мТл). Во время радиационных экспериментов и магнитных измерений отслеживалась единая ориентация образцов (см. рис. 1) с целью проверки гипотезы о возможности образования радиационной остаточной намагниченности RIRM, ранее выдвинутой в работе [Rowe, 1978].

3.4. Базовые принципы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом

Для лучшего понимания экспериментальных результатов, представленных ниже (см. разделы 4.1–4.2), кратко рассмотрим некоторые базовые физические принципы взаимодействия ионного пучка с материалом мишени в случае металлов (протон здесь рассматривается как самый легкий ион). Как уже упоминалось во введении, энергии облучения в радиационных экспериментах с протонами и ионами свинца были выбраны так, чтобы не превышать соответствующие энергетические барьеры начала ядерных реакций. Таким образом, ионный пучок взаимодействует с материалом мишени только через (1) прямую ионизацию материала мишени или (2) упругие столкновения с атомами решетки мишени, или оба эти механизма [Holbert, 2008]. Заряженные частицы теряют свою кинетическую энергию почти исключительно за счет ионизации мишени до того момента, пока их энергия не упадет ниже порогового уровня E_{th} (от англ. “threshold” — порог), который составляет ~1 кэВ для металлического железа [Butler, Cox, 1971]. Однако, ионизация в металлах не приводит к необратимым повреждениям, и для металлов механизм (2) является наиболее важным механизмом радиационного повреждения [Holbert, 2008]. Ниже E_{th} бомбардирующие частицы теряют свою энергию через смещение атомов, в результате которых в кристаллической структуре образуются точечные дефекты (такие как вакансии и междоузельные атомы). Одна налетающая частица может привести (после первого столкновения) к “каскаду столкновений”: первый выбитый атом будет далее выбивать другие атомы решетки [Butler, Cox, 1971, 1974].

Согласно базовой теории радиационных повреждений металлических тел [Butler, Cox, 1974],

энергия, которую может получить первый выбитый атом ограничена и выражается как:

$$E_p(Max) = 4EMm/(M + m)^2, \quad (2)$$

где E и M — энергия и масса налетающей частицы, соответственно; m — масса атома решетки мишени.

Средняя энергия, которую получает первый выбитый атом, определяется по формуле:

$$\bar{E}_p = E_d \ln \left(\frac{E_p(Max)}{E_d} \right), \quad (3)$$

где E_d — энергия, необходимая для выбивания атома из узла решетки ($E_d \sim 27$ эВ для металлического железа [Dienes, Vineyard, 1957]).

В нашем случае $E_p \gg E_d$, поэтому среднее число выбитых атомов на одно первичное столкновение составляет:

$$\tilde{\nu} \cong \frac{\bar{E}_p}{2E_d}. \quad (4)$$

Таким образом, в настоящей работе в случае железной мишени, протонные бомбардировки привели к каскадам столкновений числом $\tilde{\nu} \sim 3.5$ ($\bar{E}_p = 187$ эВ) и $\tilde{\nu} \sim 3.9$ ($\bar{E}_p = 208$ эВ) выбитых атомов Fe на одно первичное столкновение для энергий протонного облучения $E_1 = 400$ кэВ и $E_2 = 850$ кэВ, соответственно. При свинцово-ионной бомбардировке с энергией облучения 1 ГэВ $\tilde{\nu} \sim 8.5$ ($\bar{E}_p = 459$ эВ).

Накопление в процессе облучения точечных дефектов выше некоторой критической концентрации (критическое повреждение) может привести к частичному разупорядочению атомов или аморфизации (то есть, спонтанному фазовому переходу из кристаллического в аморфное состояние) облученной области кристалла (например, авторы работы [Тетельбаум, Менделева, 2004] предлагают простую механическую модель аморфизации при ионном облучении твердых тел). Микроструктурные изменения в облученных твердых телах влияют и на макроскопические свойства, такие как объемные макромагнитные свойства.

Аморфизация твердых тел под действием быстрых нейтронов ($\phi \sim 10^{20}$ см⁻²) была рассмотрена в ряде работ [Дубинин и др., 1998]; под действием быстрых нейтронов некоторые твердые тела испытывают не аморфизацию, а простое атомное разупорядочение [Дубинин и др., 1998]. О радиационном упорядочении — эффе́кте, обратном радиационной аморфизации, монокристалла никелистого железа после нейтронной бомбардировки сообщено в работе [Néel et al., 1964]. Важно отметить, что вышеописанный механизм механической аморфизации принципи-

ально не зависит от температуры и радикально отличается от эффекта аморфизации, связанного с локальным плавлением вещества вдоль ионных (нейтронных) треков с последующим быстрым охлаждением, результатом которого является затвердевание аморфной фазы внутри облученной области вещества [Тетельбаум, Менделева, 2004].

Интересно отметить, что ионное облучение может быть источником образования примесей в кристаллической решетке [Holbert, 2008]. Действительно, бомбардирующие протоны замедляются и захватывают необходимые для их нейтронизации электроны. Таким образом, протоны становятся водородом и могут стать причиной вспучивания материала в результате внутреннего давления соседних атомов [Holbert, 2008]. Однако, в настоящей работе вспучивание материала образцов в результате протонной бомбардировки не наблюдалось.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Облучение протонами

4.1.1. Тепловые эффекты

Образцы после протонной бомбардировки представлены на рис. 1 (фото). Радиационно-индуцированные изменения в магнитных свойствах облученных образцов представлены в табл. 2 и табл. 3.

Как видно из рис. 1, с увеличением флюенса протонов наблюдается последовательное изменение цвета эпоксидной смолы. Хотя термopара, с помощью которой контролировалась температура во время протонной бомбардировки, не показывала температур выше 38°C , наблюдаемое потемнение эпоксидной смолы может указывать на возможный радиационно-индуцированный нагрев образцов. Для оценки верхнего предела температур, мы провели пошаговый нагрев образцов эпоксидной смолы той же марки до 230°C . Цвет первой, второй и третьей групп образцов был достигнут при температурах $110^{\circ}\text{C} < T_1 < 160^{\circ}\text{C}$, $T_2 \sim 190^{\circ}\text{C}$, $T_3 \sim 230^{\circ}\text{C}$, соответственно. Это согласуется с тем фактом, что тепловое старение эпоксидных смол начинается при 120°C , в то время как короткая экспозиция материала воздействию температур в диапазоне $230\text{--}250^{\circ}\text{C}$ вызывает его разрушение [Гордон, 1963]. Поскольку мы не наблюдали механического разрушения облученных образцов, T_3 не превышала 230°C .

В отличие от экспериментов по нагреву, протонная бомбардировка может вызывать потемнение эпоксидной смолы в результате действия другого механизма. Потемнение органических полимеров может происходить за счет химической реакции протонов со структурой полимера, что приводит к разрывам связей молекул полимера и освобождению различных элементов, таких как

углерод, посредством разрыва межатомных связей [Коптелов и др., 2008]. Действительно, о радиационно-наведенных увеличении хрупкости и карбонизации эпоксидных смол сообщалось в работе [Kircher, Bowman, 1964]. Интересно отметить, что авторы работы [Коптелов и др., 2008] указывают, что изменения физических свойств полимеров появляются ниже определенного критического флюенса ϕ_{cr} (от англ. “critical”) как результат разрыва межатомных связей. Выше ϕ_{cr} можно ожидать видимую потерю диэлектрических свойств при облучении. Критический флюенс протонов для исследованного в работе Коптелов и др., [2008] полимера каптон ($\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_5$) составляет $\phi_{cr} = 3.1 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$, что выше максимального флюенса протонов ϕ_3 , использованного в настоящей работе. Таким образом, во всех описанных в настоящей работе экспериментах эпоксидная смола сохранила свои диэлектрические свойства при протонной бомбардировке. Благодаря своей низкой теплопроводности, эпоксидная смола, использованная в наших экспериментах в качестве немагнитной матрицы для всех синтетических образцов, могла защитить магнитные зерна от равномерного нагрева по всему объему (см. табл. 1).

Значит, в наших экспериментах радиационно-индуцированное потемнение образцов может быть обусловлено как карбонизацией эпоксидной смолы, так и одновременным нагревом до температур не выше T_1 , T_2 , T_3 (см. выше). Возможный нагрев был, вероятно, локальным и затронул только самые верхние слои образцов. Нагрев образцов может привести к отжигу старых и вновь образованных дефектов кристаллической решетки, делая, таким образом, радиационно-индуцированные изменения в объемных магнитных свойствах образцов менее заметными. Поэтому, если не утверждается обратное, далее мы будем обсуждать зависимость объемных магнитных свойств от дозы облучения только для образцов первой и второй групп, считая, что образцы третьей группы подверглись заметному нагреву. Важно отметить, что единственные образцы с температурой Кюри ниже 200°C – это образцы базальтов ($T_c = 150^{\circ}\text{C}$); все остальные образцы имеют гораздо более высокие точки Кюри (295°C для гексагонального пирротина, 325°C для моноклинного пирротина, и выше для остальных образцов), что исключает возможность образования значительной термоостаточной намагниченности при нагреве образцов в результате протонной бомбардировки и их последующем охлаждении в магнитном поле зоны облучения².

Таблица 3. Остаточная намагниченность образцов до и после протонной бомбардировки

Образец	I_{rx}	I_{ry}	I_{rz}	I_r	Образец	I_{rx}	I_{ry}	I_{rz}	I_r
Название образца (**)					Название образца (**)				
Микродиорит					Моноклинный пирротин 2				
1-1 (I_{r0})	0.1	3.1	−0.1	3.1	5-1 (I_{r0})	0.2	2.7	−0.1	2.7
1-1 (RIRM)	1.3	3.1	−1.2	3.5	5-1 (RIRM)	3.6	2.2	2.8	5.1
1-2 (I_{r0})	−0.2	2.2	−0.2	2.2	5-2 (I_{r0})	0.0	3.3	−0.4	3.4
1-2 (RIRM)	−0.1	1.6	1.3	2.1	5-2 (RIRM)	10	−2.2	−1.4	10
1-3 (I_{r0})	0.4	3.0	0.2	3.1	5-3 (I_{r0})	0.7	3.0	0.1	3.1
1-3 (RIRM)	1.3	3.2	1.9	3.9	5-3 (RIRM)	1.4	2.3	−0.1	2.7
1-a (I_{r0})	—	—	—	1.9	5-a (I_{r0})	—	—	—	2.6
1-a (RIRM)	−1.2	0.2	4.6	4.8	5-a (RIRM)	−1.7	−0.3	0.1	1.7
Базальт					Железо в эпоксидной смоле				
2-1 (I_{r0})	−0.6	5.6	0.0	5.7	6-1 (I_{r0})	−0.1	3.8	−0.5	3.8
2-1 (RIRM)	4.4	6.4	2.2	8.0	6-1 (RIRM)	1.9	2.3	−2.4	3.9
2-2 (I_{r0})	−0.5	6.1	0.1	6.1	6-2 (I_{r0})	−0.1	3.4	0.2	3.4
2-2 (RIRM)	2.4	7.8	1.2	8.2	6-2 (RIRM)	5.1	0.4	1.4	5.3
2-3 (I_{r0})	−0.7	6.0	−0.1	6.0	6-3 (I_{r0})	0.0	5.0	−0.3	5.0
2-3 (RIRM)	7.3	6.3	6.7	12	6-3 (RIRM)	1.6	2.3	0.1	2.8
2-a (I_{r0})	—	—	—	3.2	6-a (I_{r0})	—	—	—	1.0
2-a (RIRM)	−1.9	0.5	0.0	2.0	6-a (RIRM)	−0.8	0.1	−0.2	0.8
Гексагональный пирротин					6-b (I_{r0})	—	—	—	1.0
3-1 (I_{r0})	−2.7	88	9.0	89	6-b (RIRM)	−0.9	0.2	0.1	1.0
3-1 (RIRM)	2.2	87	8.1	87	Метеорит Bensour				
3-2 (I_{r0})	−9.9	90	−0.7	91	7-1 (I_{r0})	−0.2	16	−0.8	16
3-2 (RIRM)	−8.1	85	5.7	85	7-1 (RIRM)	0.7	2.7	−8.6	9.0
3-3 (I_{r0})	−0.5	75	−13	76	7-2 (I_{r0})	0.2	7.2	0.3	7.2
3-3 (RIRM)	−1.5	57	−8.8	57	7-2 (RIRM)	−0.1	2.8	0.1	2.8
3-a (I_{r0})	—	—	—	38	7-3 (I_{r0})	−0.1	4.4	−0.3	4.4
3-a (RIRM)	−19	24	−13	33	7-3 (RIRM)	−0.4	3.5	0.6	3.6
3-b (I_{r0})	—	—	—	50	7-a (I_{r0})	—	—	—	5.7
3-b (RIRM)	−18	25	−26	40	7-a (RIRM)	−0.7	23	−2.2	23
Моноклинный пирротин 1					Магнетит в эпоксидной смоле				
4-1 (I_{r0})	−0.3	2.4	0.4	2.5	8-1 (I_{r0})	0.1	4.1	0.0	4.1
4-1 (RIRM)	1.8	2.2	0.5	2.9	8-1 (RIRM)	0.6	2.9	−0.4	3.0
4-2 (I_{r0})	0.8	1.8	0.2	1.9	8-2 (I_{r0})	0.0	1.5	0.1	1.5
4-2 (RIRM)	2.3	1.8	1.0	3.1	8-2 (RIRM)	0.5	1.1	−0.4	1.2
4-3 (I_{r0})	0.1	2.0	−0.8	2.1	8-3 (I_{r0})	0.1	3.1	0.1	3.1
4-3 (RIRM)	2.2	3.7	−1.9	4.7	8-3 (RIRM)	−0.1	1.0	0.0	1.1
4-a (I_{r0})	—	—	—	1.7	8-a (I_{r0})	—	—	—	0.2
4-a (RIRM)	−1.1	0.0	0.2	1.1	8-a (RIRM)	−0.1	0.0	0.0	0.1

** Вид остаточной намагниченности I_r ; I_{r0} — преириационная остаточная намагниченность, оставшаяся после размагничивания переменным полем с амплитудой 120 мТл; RIRM — радиационная остаточная намагниченность, измеренная после протонной бомбардировки; I_{rx} , I_{ry} , I_{rz} и I_r — x-, y-, z-компоненты и суммарная интенсивность остаточной намагниченности, соответственно (в % от пострadiационной SIRM, значение I_{rx} положительное в случае коллинеарности направлению распространения протонного пучка. {x, y, z} — система координат 2G SQUID магнитометра.

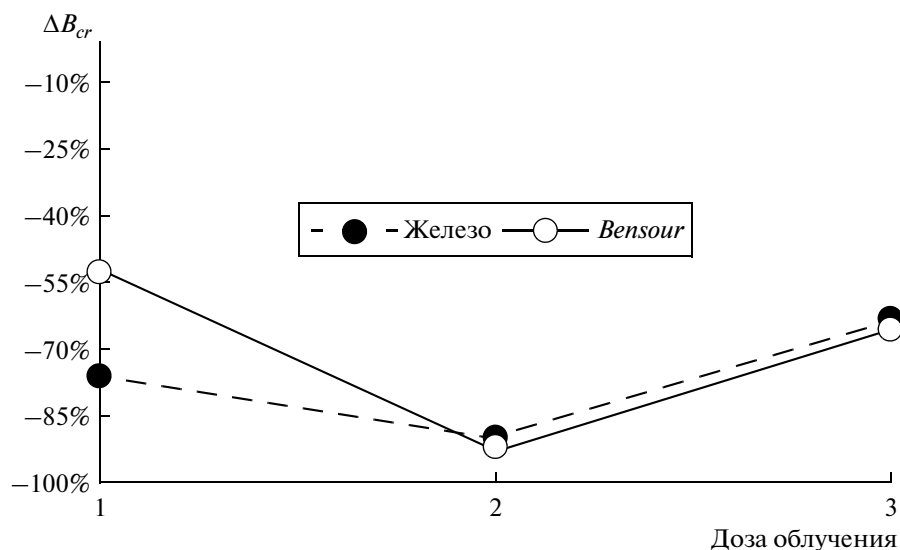


Рис. 2. Относительные изменения значений остаточной коэрцитивной силы B_{cr} после протонной бомбардировки для образцов порошкового железа в эпоксидной смоле и метеорита *Bensour*. Отрицательные значения указывают на радиационно-индуцированное снижение магнитной жесткости (уменьшение B_{cr}).

4.1.2. Радиационно-индуцированные изменения в магнитных свойствах образцов

Относительные изменения (%) в объемных магнитных свойствах при облучении протонами представлены в табл. 2. Наблюдается существенное радиационно-индуцированное уменьшение B_{cr} для всех образцов железа и хондрита *Bensour*. B_{cr} уменьшается с увеличением ϕ (рис. 2). Уменьшение магнитной жесткости (*magnetic softening*) может быть результатом радиационно-индуцированной аморфизации или атомного разупорядочения железных фаз (см. выше, раздел 3.4), что согласуется с наблюдаемым уменьшением SIRM (7–34%). На всех образцах железа (здесь и далее имеются в виду образцы порошкового железа в эпоксидной смоле) после протонной бомбардировки также наблюдается уменьшение значений B_c (на 27–29%) и MDF_i (медианное поле разрушения SIRM, от англ. “Median Destructive Field”) (на 17–24%), и незначительные изменения в χ_0 ($\leq 2\%$) и M_s ($\leq 5\%$).

В работе [Butler, Cox, 1974] ранее сообщалось об увеличении после нейтронной бомбардировки значений B_c многодоменного железа и камасита на 5–20% (причем B_c возвращалось к своему исходному предрадиационному значению после отжига при температуре 200–300°C [Butler, Cox, 1974]). Эти результаты нельзя прямо сравнивать с экспериментами настоящей работы ввиду разной природы бомбардирующих частиц (нейтральные вместо заряженных). Кроме того, в работе [Butler, Cox, 1974] нет информации о значениях B_{cr} до и после облучения для возможности сравнения; значения же B_c до облучения были в диапазоне

0.028–0.08 мТл, что значительно ниже предоблученных значений B_c образцов, исследованных в настоящей работе (1–2 мТл, см. табл. 1).

Для подтверждения отсутствия связи между наблюдаемым уменьшением магнитной жесткости образцов железа с возможным радиационно-индуцированным нагревом, мы провели дополнительные эксперименты по нагреву дополнительного необлученного железного образца (образец 6-4). При этом наблюдалось небольшое уменьшение B_{cr} (от 21 до 19 мТл) при поэтапном нагреве до 230°C, что не может объяснить изменения, наблюдаемые в радиационных экспериментах (рис. 3). Нагрев дополнительного (необлученного) фрагмента тэнитсодержащего метеорита *Bensour* до 115°C также привел к незначительному изменению B_{cr} (от 33 до 32 мТл).

Значительных радиационно-индуцированных изменений в B_{cr} , B_c , SIRM образцов моноклинного пирротина не наблюдалось, хотя значения M_s изменились на 22% (на разных образцах наблюдалось как увеличение, так и уменьшение этой величины, см. табл. 2). Значительное увеличение M_s наблюдается также на одном базальтовом образце (36%), в то время как образцы порошкового магнетита в эпоксидной смоле демонстрируют уменьшение M_s (на 7–22%).

Образцы гексагонального пирротина характеризуются уменьшением B_{cr} (на 17%), но незначительными изменениями M_s ($\leq 9\%$) и отсутствием ($\leq 5\%$) изменений B_c . Мы изучили магнитные свойства двух дополнительных (необлученных) образцов гексагонального пирротина (образцы 3-4 и 3-5) при нагреве. В отличие от радиационных экспе-

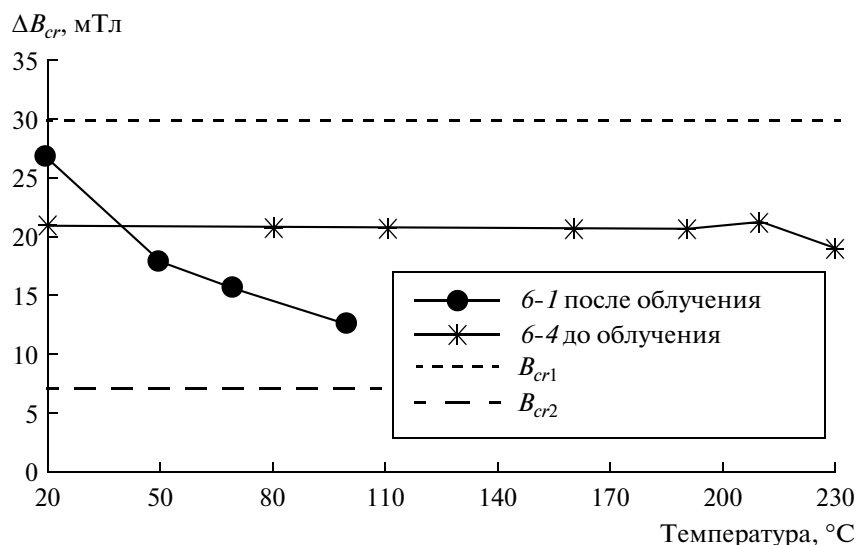


Рис. 3. Температурная зависимость остаточной коэрцитивной силы B_{cr} для необлученного образца 6-4 и облученного протонами образца 6-1. Отжиг образца 6-4 длительностью 1–2 ч. производился на каждом температурном шаге. Образец 6-1 отжигался на каждом температурном шаге в течении 5 мин. B_{cr1} и B_{cr2} – пред- и пострadiaционные значения остаточной коэрцитивной силы, измеренные на образце 6-1 до и сразу после протонной бомбардировки.

риментов, при нагреве обоих дополнительных образцов наблюдается значительное уменьшение значений B_{cr} и B_c (см. табл. 4 и рис. 4). В то же время наблюдается значительное увеличение M_{rs} и M_s после нагрева, что может быть связано с образованием метастабильных ферромагнитных зерен. Другие термо-индуцированные изменения приведены в табл. 4. Все пострadiaционные значения B_c и B_{cr} выше соответствующих значений для дополнительных образцов до и после нагрева. Таким образом, как и в случае других образцов, радиационно-индуцированные изменения в гексагональном пирротине также не связаны с возможным радиационно-индуцированным нагревом.

В отличие от рассмотренных выше случаев, два магнетитсодержащих образца (1-1 и 8-3) демонстрируют пострadiaционное увеличение B_{cr} . Это не согласуется как с наблюдаемым уменьшением B_{cr} других образцов тех же типов (1-3, 8-2), так и с соответствующим значением ϕ .

Чтобы оценить эффект магнитного последствия [Néel, 1952] на облученных образцах и возможные изменения магнитных свойств облученных образцов со временем, мы снова измерили B_{cr} образца порошкового железа в эпоксидной смоле 6-1 через 24 месяца после протонного облучения и последующего хранения этого образца при комнатной температуре в магнитном поле Земли. Было обнаружено значительное увеличение B_{cr} по сравнению с соответствующей исходной пострadiaционной величиной. Таким образом, образец почти вернулся в свое исходное (предрадиационное)

состояние за не более, чем два года релаксации. Это можно объяснить механизмом диффузионного последствия [Néel, 1952]: атомы решетки, выбитые в результате протонной бомбардировки, частично возвращаются в исходные позиции в решетке. Ре-

Таблица 4. Изменение магнитных свойства образцов гексагонального пирротина при нагреве

Название образца	T	B_{cr}	B_c	B_{cr}/B_c	M_s	M_{rs}/M_s
3-4 ($m = 36.5$ мг)	20	242	120	2.0	4.4	0.39
	80	243	117	2.1	4.3	0.42
	110	220	109	2.0	4.4	0.37
	160	208	127	1.6	5.4	0.41
	190	170	108	1.6	9.3	0.41
	210	108	74	1.5	8.6	0.44
	230	25	17	1.5	47.8	0.24
3-5 ($m = 21.7$ мг)	20	215	105	2.1	2.3	0.44
	80	207	—	—	—	—
	110	192	96	2.0	3.2	0.37
	160	185	108	1.7	4.4	0.35
	190	156	95	1.6	6.4	0.37

3-4 и 3-5 – образцы необлученного гексагонального пирротина. m – масса; T – температура (в °C); B_c и B_{cr} – коэрцитивная сила и остаточная коэрцитивная сила (в мТл), соответственно; M_s и M_{rs} – намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения (в мкАм²), соответственно. Отжиг на каждом температурном шаге проводился в течении 1–2 часа.

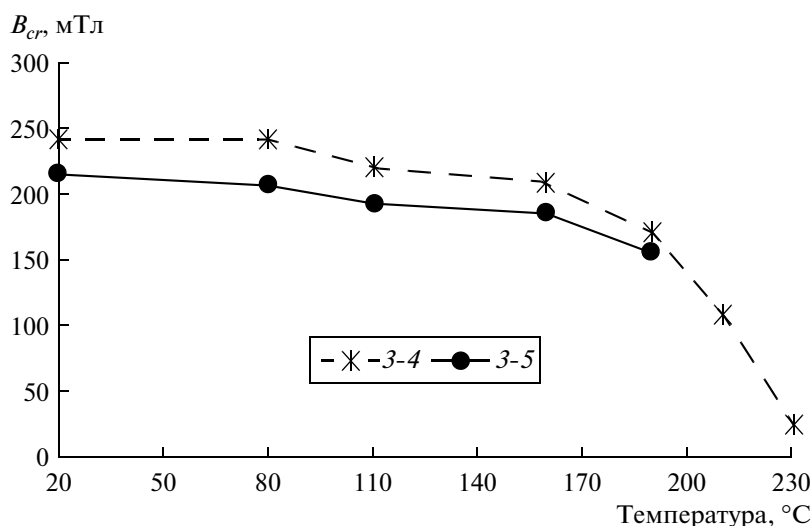


Рис. 4. Температурная зависимость остаточной коэрцитивной силы B_{cr} для необлученных образцов гексагонального пирротина 3-4 и 3-5. Образцы отжигались в течении 1–2 ч на каждом температурном шаге.

лаксия кристаллических точечных дефектов со временем обращает радиационно-индуцированную аморфизацию железа. Стоит отметить, что облученные образцы железа стали более чувствительными к нагреву, чем соответствующие необлученные образцы: так нагрев облученного образца 6-1 до 100°C (с пятиминутным отжигом на каждом температурном шаге) привел к уменьшению B_{cr} от 27 до 13 мТл (рис. 3).

Мы не наблюдали никаких изменений в частотной зависимости магнитной восприимчивости после облучения, что исключает возможность образования значительного количества суперпарамагнитных частиц во время облучения.

4.1.3. Радиационно-индуцированное намагничивание и размагничивание образцов

В отличие от Rowe [1978], мы наблюдали значительные изменения в остаточной намагниченности облученных образцов (см. табл. 3, рис. 5, рис. 6). Под действием протонной бомбардировки некоторые образцы (образцы гексагонального пирротина, метеорита *Bensour* и порошкового магнетита в эпоксидной смоле) были размагничены, в то время как другие образцы (образцы моноклинного пирротина, базальта и микродиорита) приобрели остаточную намагниченность. Тот факт, что не все образцы приобрели остаточную намагниченность, исключает возможность магнитной контаминации образцов (из-за близости магнитных объектов или манипуляций с ними) в ходе экспериментов. Таким образом, наблюдаемая приобретенная остаточная намагниченность, вероятно, связана с процессами облучения и в дальнейшем называется RIRM.

В большинстве случаев направление RIRM перпендикулярно поверхности образца (далее плоскость $y-z$), т.е. коллинеарно направлению распространения пучка протонов (далее $+x$). Поэтому, для того, чтобы изолировать процессы радиационного индуцирования остаточной намагниченности протонным пучком и дальнейшего размагничивания первоначальной предрадиационной остаточной намагниченности (то есть, намагниченности, изначально направленной вдоль y , оставшейся после чистки SIRM переменным магнитным полем 120 мТл), мы построили отдельно x и $y-z$ компоненты I_{r0} и RIRM (рис. 5 и рис. 6, соответственно). Большинство образцов демонстрирует образование значительной намагниченности в направлении, коллинеарном направлению распространения пучка протонов и размагничивание или отсутствие изменений в плоскости $y-z$ (независимо от общего эффекта намагничивания или размагничивания образца). В случае радиационно-индуцированного увеличения компоненты намагниченности в плоскости $y-z$, это увеличение незначительно по сравнению с x -составляющей (<30% от x -компоненты). Единственное исключение составляют образцы базальта. Таким образом, в некоторых случаях (например, образцы 7-1, 8-1, 8-2), несмотря на общий эффект размагничивания образца (уменьшение остаточной намагниченности после облучения), наблюдается образование остаточной намагниченности в направлении прохождения протонного пучка (увеличение x -компоненты).

Разные магнитные минералы по-разному реагируют на протонную бомбардировку. Также мы не наблюдали связи между дозой облучения и интенсивностью RIRM. Примеры кривых магнитной чистки (AF) пред- и пострadiационных

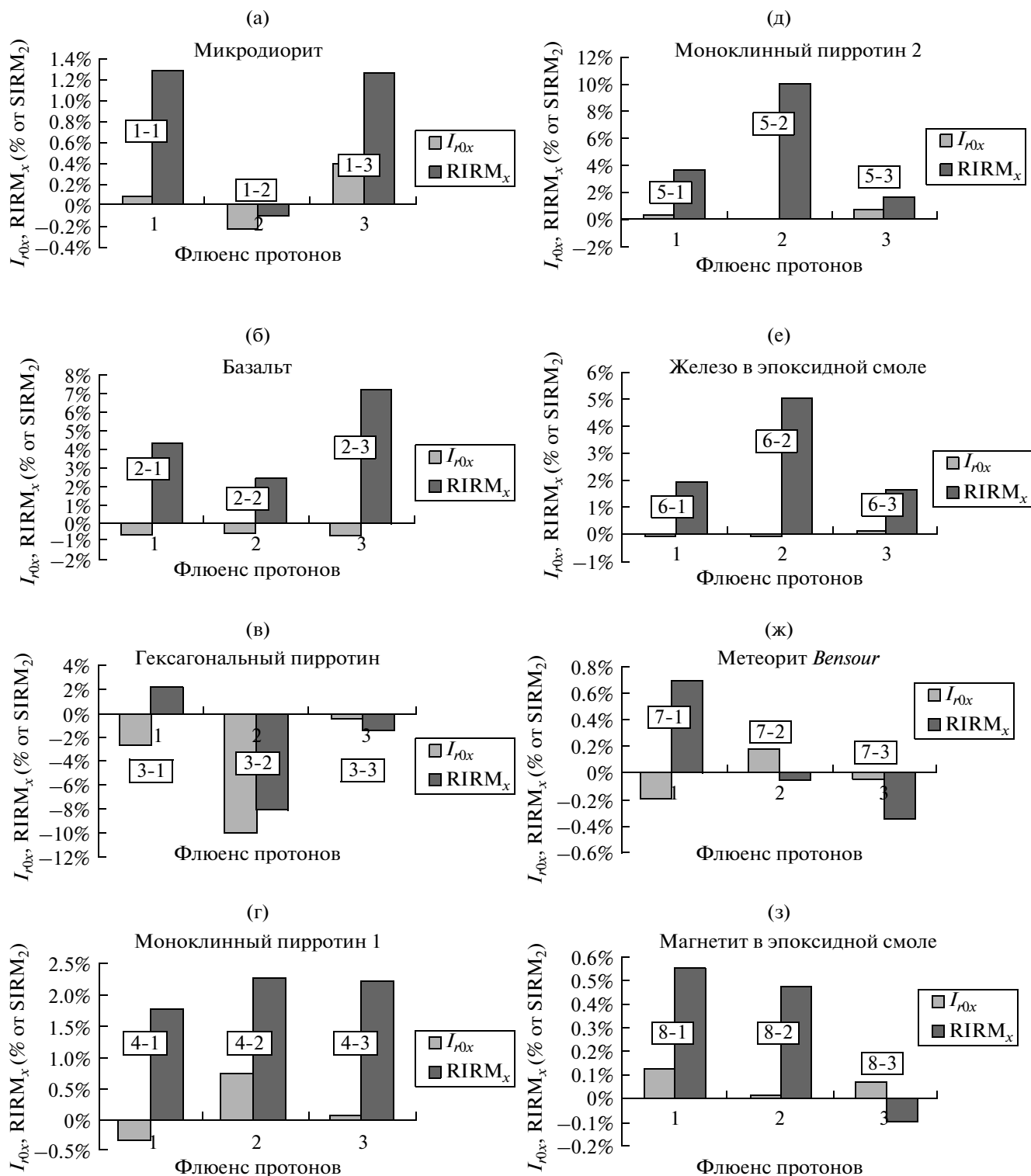


Рис. 5. Гистограммы x -компонент прерадиационной (I_{r0x}) и пострадиационной остаточной намагниченности ($RIRM_x$) (в % от пострадиационного значения остаточной намагниченности насыщения $SIRM_2$), построенные для минимального (ϕ_1), среднего (ϕ_2) и максимального (ϕ_3) флюенса протонов, соответственно: (а) – микродиорит; (б) – базальт; (в) – гексагональный пирротин; (г) – моноклинный пирротин 1; (д) – моноклинный пирротин 2; (е) – порошковое железо в эпоксидной смоле; (ж) – метеорит *Bensour*; (з) – порошковый магнетит в эпоксидной смоле. Для каждого двойного столбика гистограммы, левый и правый столбики соответствуют пред- и пострадиационной остаточной намагниченности, соответственно.

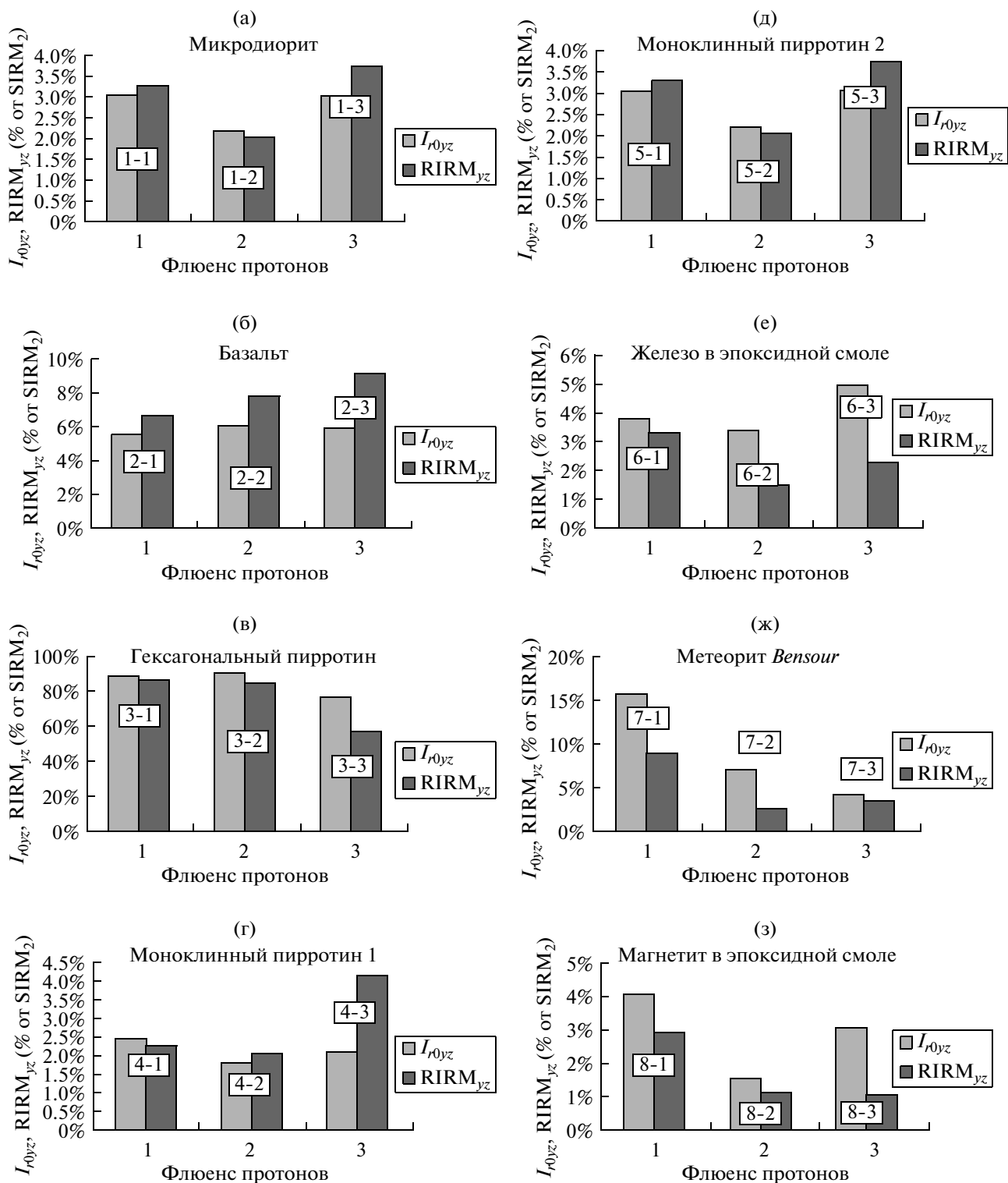


Рис. 6. Гистограммы ($y-z$)-компонент прерадиационной (I_{r0yz}) и пострадиационной остаточной намагниченности ($RIRM_{yz}$) (в % от пострадиационного значения остаточной намагниченности насыщения $SIRM_2$), построенные для минимального (Φ_1), среднего (Φ_2) и максимального (Φ_3) флюенса протонов, соответственно: (а) – микродиорит; (б) – базальт; (в) – гексагональный пирротин; (г) – моноклинный пирротин 1; (д) – моноклинный пирротин 2; (е) – порошковое железо в эпоксидной смоле; (ж) – метеорит *Bensour*; (з) – порошковый магнетит в эпоксидной смоле. Для каждого двойного столбика гистограммы, левый и правый столбики соответствуют пред- и пострадиационной остаточной намагниченности, соответственно.

SIRM и RIRM, также как и соответствующие диаграммы Зийдервельда и стереограмма приведены на рис. 7а–7е. Носителями RIRM, очевидно, являются низкокоэрцитивные магнитные зерна с MDF в диапазоне 4–9 мТл. Может возникнуть вопрос о возможной связи образования RIRM с магнитной жесткостью образцов. Мы не наблюдали такую корреляцию.

После облучения образцов (порошкового магнетита в эпоксидной смоле, базальтов и др.), предварительно размагниченных переменным магнитным полем 80 мТл, протонами с энергией 35 МэВ, Rowe [1978] не наблюдал никаких изменений в их остаточной намагниченности. Причиной неудачной попытки Rowe [1978] экспериментального подтверждения гипотезы образования RIRM при протонной бомбардировке могут быть как другие использованные образцы (в сравнении с настоящей работой), так и отличный диапазон энергий облучения, использованный Rowe в экспериментах. Маловероятно, что это связано с недостаточной чувствительностью использованного в его работе магнитометра ($\sim 10^{-9}$ Ам²/г).

На данном этапе работы физический механизм образования RIRM не до конца ясен и должен стать предметом последующих теоретических исследований. Однако, в связи со специфической геометрией пучка протонов, мы можем исключить гипотезу приобретения RIRM в магнитном поле, сгенерированном при прохождении пучка заряженных частиц. Действительно, в наших экспериментах протонный пучок диаметром несколько миллиметров перемещался по зоне облучения (окну экспозиции) с некоторыми горизонтальной и вертикальной частотами, а не был статичным и сфокусированным на одной точке. Магнитное поле, сгенерированное фиксирован-

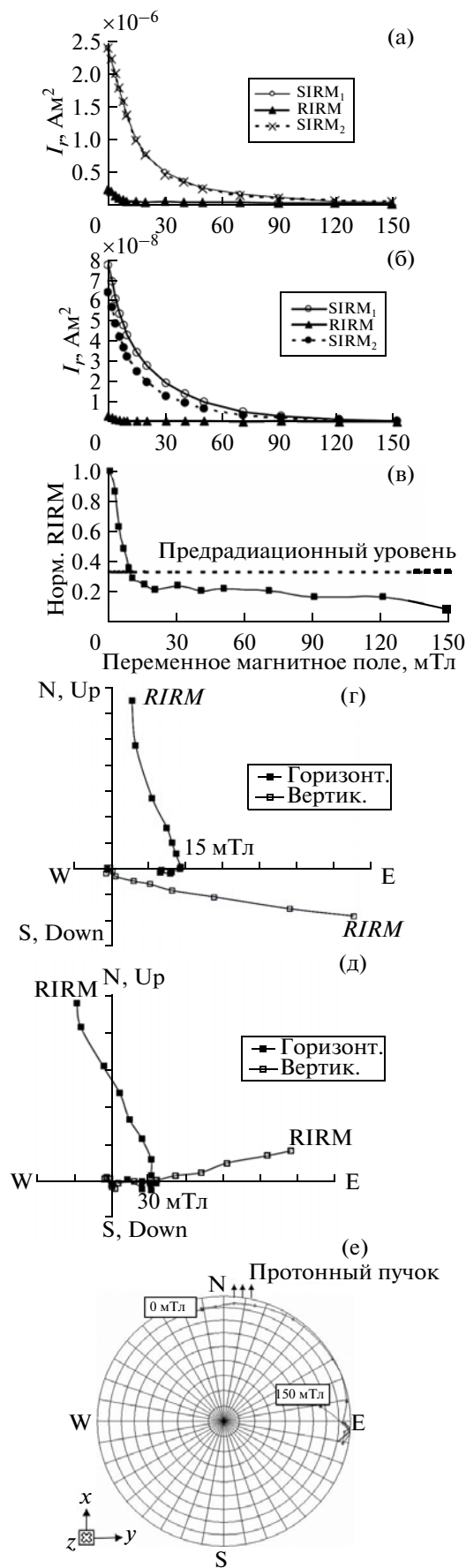


Рис. 7. Зависимость пред- и пострadiaционной остаточной намагниченности насыщения SIRM и радиационной остаточной намагниченности RIRM от переменного магнитного поля для образцов (а) моноклинного пирротина 5-2, (б) порошкового железа в эпоксидной смоле 6-2; (в) — зависимость приведенной RIRM от переменного магнитного поля для образца 5-2. Ортогональные проекции вертикальной и горизонтальной компонент намагниченности (диаграммы Зийдервельда), полученные при ступенчатом размагничивании RIRM переменным магнитным полем с амплитудой до 150 мТл для (г) образца 6-2 и (д) образца 5-2; “горизонт.” и “вертик.” обозначают горизонтальную и вертикальную проекции намагниченности; (е) — стереограмма, полученная при ступенчатом размагничивании RIRM образца 5-2 переменным магнитным полем с максимальной амплитудой до 150 мТл; $\{x, y, z\}$ — система координат 2G SQUID магнитометра. SIRM₁ и SIRM₂ — пред- и пострadiaционное значения остаточной намагниченности насыщения, соответственно; N, E, W, S, Up, Down — север (north), восток (east), запад (west), юг (south), вверх и низ, соответственно.

ным протонным пучком, было бы слишком низким (~ 0.4 нТ в случае силы тока 2 мкА) для наведения значительной остаточной намагниченности.

4.2. Облучение ионами свинца

Как и в случае протонного облучения третьей группы образцов (с флюенсом Φ_3), свинцово-ионное облучение привело к резкому изменению цвета эпоксидной смолы, подвергшейся экспозиции (порошковые образцы в эпоксидной смоле, а также поддерживающие диски из эпоксидной смолы с диаметром больше наклеенных сверху образцов). В работе [Sadykov et al., 2011] сообщается о снижении степени упорядоченности полимера каптон при бомбардировке ионами свинца в результате разрыва атомных связей. Такой механизм также может привести к почернению эпоксидной смолы. Как обсуждалось выше (см. раздел 4.1.1), ввиду отсутствия признаков разрушения эпоксидной смолы при облучении, возможный радиационно-индуцированный нагрев не превышал 230°C . Полная энергия ионов свинца составляла 1 ГэВ (~ 5 МэВ /а. е. м.) и максимальная глубина проникновения не превышала 200 мкм. Такая энергия налетающих частиц значительно ниже той, которая на сегодняшний день наблюдается для ионов, проникающих в солнечную полость (ГэВ /а. е. м.)

4.2.1. Радиационно-индуцированные изменения в магнитных свойствах образцов

Свинцово-ионное облучение привело к некоторым значительным изменениям в объемных магнитных свойствах образцов (см. табл. 2). В отличие от экспериментов по протонной бомбардировке, свинцово-ионная бомбардировка привела к изменению значений χ_0 : наблюдалось увеличение χ_0 на 6–19% для всех пирротинсодержащих образцов и уменьшение χ_0 на 6–29% для магнетит- и титатомagnetитсодержащих образцов. Образцы железа и метеорита *Bensour* характеризуются отсутствием (или пренебрежимо малым) изменением значений χ_0 .

Снижение B_{cr} (максимально на 58%) наблюдается для всех железосодержащих образцов, за исключением образца *6-b*, который частично разрушился при свинцово-ионной бомбардировке (поэтому данные по этому образцу могут не быть достоверными). Эффект снижения магнитной жесткости сопровождается увеличением значений SIRM на 14–37%. Изменения соответствующих значений MDF_i незначительны (за исключением образца *7-a*, для которого наблюдается уменьшение MDF_i на 15% после ионной бомбардировки).

В отличие от экспериментов по протонному облучению, свинцово-ионная бомбардировка

привела к увеличению значений M_s для обоих образцов железа. Образцы моноклинного пирротина не демонстрируют никаких значительных радиационно-индуцированных изменений, за исключением небольшого уменьшения значений SIRM. В случае образцов гексагонального пирротина только половина их поверхности подверглась облучению из-за узкого окна экспозиции; эти образцы характеризуются уменьшением B_c на 12–25% и пренебрежимо малыми изменениями значений M_s . Уменьшение значений B_c наблюдалось для образцов *3-4* и *3-5* и при нагреве (см. табл. 4). Однако, в результате нагрева наблюдалось одновременное увеличение M_s и значительное уменьшение B_{cr} , что не наблюдается в экспериментах по свинцово-ионному облучению.

В отличие от железосодержащих образцов, оба магнетитсодержащие образца демонстрируют радиационно-индуцированный эффект увеличения магнитной жесткости (увеличение B_{cr} на $\sim 20\%$), который также сопровождается увеличением значений B_c на 11–25% и изменением значений SIRM (образец *1-a*: увеличение на 8%; образец *8-a*: уменьшение на 16%). Эти результаты согласуются с наблюдаемым увеличением значений MDF_i на 4–9%. Эффект увеличения магнитной жесткости ранее наблюдался на тех же типах образцов (*1-1*, *8-3*) в результате протонной бомбардировки. На образце базальта *2-a* не наблюдалось никаких радиационно-индуцированных изменений, за исключением уменьшения значений SIRM и MDF_i на 6%.

С точки зрения радиационно-индуцированных изменений в магнитных свойствах материала мишени, свинцово-ионная бомбардировка не является более эффективной, чем протонная бомбардировка. Это согласуется с сопоставимым числом выбитых атомов на одну налетающую частицу в среднем каскаде столкновений: 7.4 для протонов (с обеими энергиями облучения) и 8.5 для ионов свинца (см. раздел 3.4).

4.2.2. Радиационно-индуцированное намагничивание и размагничивание образцов

В результате свинцово-ионной бомбардировки некоторые образцы приобрели значительную остаточную намагниченность. Ионный пучок был перпендикулярен поверхности образцов, и приобретенная намагниченность образовалась вдоль направления распространения пучка. В отличие от экспериментов по протонной бомбардировке, в данном случае для всех образцов x -компонента пострadiационной остаточной намагниченности (I_{rx}) коллинеарна направлению, обратному к направлению распространения ионного пучка.

Образование RIRM имело место для двух облученных образцов. Интенсивность RIRM образца микродиорита (*1-a*) и образца метеорита *Ben-*

Таблица 5. Основные магнитные свойства необлученных (*a*) и облученных (*б*) ионами аргона образцов метеоритов *Tatahouine* и *Bereba*

Название образца		χ_0	<i>SIRM</i>	<i>MDF_i</i>	B_c	B_{cr}	B_{cr}/B_c	M_s	M_{rs}/M_s
1	<i>Bereba</i> (<i>a</i>)	2.5	33	25	11	42	3.8	476.6	0.08
2	<i>Bereba</i> (<i>б</i>)	[2.5; 2.8]	[41; 45]	25	15	47	3.1	[329.5; 364.1]	0.10
3	<i>Tatahouine</i> (<i>a</i>)	0.5	0.6	14	5 ± 2	25 ± 4	[3.0; 9.7]	157.2 ± 134.4	0.02 ± 0.01
4	<i>Tatahouine</i> (<i>б</i>)	[2.1; 2.3]	[27; 30]	23	12	47	3.9	[303.7; 335.7]	0.07

χ_0 — магнитная восприимчивость (в 10^{-6} м³/кг); *SIRM* — остаточная намагниченность насыщения, полученная в магнитном поле напряженностью 3 Тл (в мАм²/кг) и измеренная при использовании *2G SQUID* магнитометра; *MDF_i* — медианное поле разрушения *SIRM* (в мТл); B_c и B_{cr} — коэрцитивная сила и остаточная коэрцитивная сила (в мТл), соответственно; M_s и M_{rs} — намагниченность насыщения (в мАм²/кг) и остаточная намагниченность насыщения, соответственно. Каждая из строк 1, 2 и 4 соответствует одному порошковому образцу метеорита, спрессованному в таблетку; в строке 3 представлены средние значения и соответствующие среднеквадратичные отклонения для девяти метеоритных фрагментов (значения χ_0 , *SIRM* и *MDF_i* получены только для одного фрагмента). В строках 2 и 4 вместо единичных значений приведены диапазоны нормированных на массу значений χ_0 , *SIRM* и M_s , что связано с пределами погрешности оценки массы метеоритного порошка в каждом облученном образце.

sour (7-а) составляет 4.8% и 23% от пострadiационных значений *SIRM*, соответственно. Оба образца характеризуются радиационно-индуцированным увеличением значений *SIRM* (на 8% для 1-а и на 37% для 7-а) и изменениями значений B_{cr} (увеличение на 17% для 1-а и уменьшение на 6% для 7-а), что согласуется с образованием *RIRM*. Медианное поле разрушения *RIRM* составляет 4 мТл для образца 1-а и 14 мТл для образца 7-а. Для всех остальных образцов под воздействием свинцово-ионного пучка наблюдался эффект размагничивания (см. табл. 3).

4.3. Облучение ионами аргона

Мы исследовали магнитные свойства двух метеоритов, ранее облученных коллективом авторов работы [Vernazza et al., 2006]. Первоначальной задачей этих экспериментов по облучению ионами аргона Ar^{2+} было изучение эффекта космического выветривания поверхности астероида Весты, что подробно описано ниже.

Поток частиц от солнца приводит к покраснению и почернению внеземных горных пород. Но поверхность Весты — второго наиболее крупного из известных астероидов солнечной системы — выглядит на удивление “свежей”. Вернацца и др. [Vernazza et al., 2006] провели эксперименты по облучению образцов метеоритов-эвкритов, которые являются характерными для поверхности Весты, ионами аргона для симуляции SW облучения поверхности этого астероида. В радиационных экспериментах были использованы ионы аргона, а не протоны с энергией 1 кэВ, которые являются гораздо более обильными в SW, потому что ранее было показано, что радиационное воздействие таких ионов на спектральные свойства ряда силикатов гораздо больше, чем соответствующее радиационное воздействие протонов [Brunetto, Strazzulla, 2005]. Исследование [Vernazza et al.,

2006] показало, что поверхность Весты должна быть значительно более выветрена, чем это наблюдается на сегодняшний день. Авторы исследования предполагают, что это связано с наличием у поверхности астероида Весты магнитного поля напряженностью не менее 0.2 мкТл, которое в несколько сотен раз меньше геомагнитного поля, но которое отклоняет повреждающие ионы. Эта гипотеза может объяснить, почему поверхность Весты выглядит “свежей” (невыветренной).

Ввиду того, что магнитные свойства облученных ионами аргона образцов не были изучены до соответствующего облучения, представляется невозможным оценить радиационное влияние на остаточную намагниченность образцов. Магнитные свойства облученных и необлученных образцов метеоритов *Tatahouine* и *Bereba* представлены в табл. 5. Для проверки однородности объемных магнитных свойств образцов метеорита *Tatahouine*, мы изучили объемные магнитные свойства девяти разных фрагментов с массой от 79 до 631 мг. Результаты показали однородность магнитных свойств материала в вышеуказанных масштабах со средними значениями $B_c = 5 \pm 2$ мТл и $B_{cr} = 25 \pm 4$ мТл. Подтверждение однородности магнитных свойств по объему позволяет сравнивать магнитные свойства разных необлученных и облученных фрагментов одних и тех же метеоритов. Значения B_c и B_{cr} согласуются с соответствующим средним значением $B_c = 4.0 \pm 3.0$ мТл, полученным для семи диогенитов (падения) [Gattassesa et al., 2008b] и средним значением $B_{cr} = 53 \pm 19$ мТл, полученным для трех диогенитов (падения) (наши неопубликованные данные). Но они значительно ниже, чем соответствующие значения для облученного образца ($B_c = 12$ мТл, $B_{cr} = 47$ мТл). Таким образом, радиационно-индуцированное увеличение магнитной жесткости наблюдается для обоих облученных образцов *Tata-*

houine и *Bereba*. Это согласуется с результатами экспериментов по нейтронной бомбардировке [Butler, Cox, 1971, 1974] и сопровождается одновременным увеличением значений SIRM и увеличением или отсутствием изменений в значениях MDF, что, вероятно, связано с созданием точечных дефектов в кристаллической структуре облученных образцов. Для образца метеорита *Bereba* наблюдается отсутствие радиационно-индуцированных изменений в значениях χ_0 и уменьшение значения M_s , тогда как для образца метеорита *Tatahouine* наблюдалось небольшое увеличение χ_0 , что согласуется с одновременным увеличением значения M_s .

5. ВЫВОДЫ

Были проведены эксперименты по облучению образцов протонами и ионами с целью оценить возможные последствия воздействий SEP и GCR на магнитные свойства горных пород и минералов. Оба типа облучения привели к существенным изменениям объемных магнитных свойств (SIRM, M_s , B_{cr}) изученных образцов. Для всех α — Fe и FeNi-содержащих образцов наблюдалось значительное снижение магнитной жесткости: до 93% уменьшения значения B_{cr} . Такой эффект, вероятно, связан с радиационно-индуцированной аморфизацией или атомным разупорядочением металлических фаз. Некоторые магнетитсодержащие образцы демонстрировали обратный эффект увеличения магнитной жесткости после протонной и свинцово-ионной бомбардировок. Такой же эффект получился для образцов метеоритов группы HED (*Tatahouine* и *Bereba*), облученных ионами аргона с энергией 400 кэВ.

Протонная и свинцово-ионная бомбардировки в магнитном поле порядка земного² приводят либо к размагничиванию, либо к намагничиванию материала мишени, что в значительной степени зависит от типа магнитной минералогии материала и, в некоторых случаях, типа ионизирующего облучения.

В случае намагничивания наблюдалось образование так называемой радиационной остаточной намагниченности RIRM. Этот новый тип остаточной намагниченности характеризуется низкими значениями медианного поля разрушения (MDF); интенсивность RIRM может зависеть как от конкретной магнитной минералогии, так и от дозы облучения. Наиболее эффективное образование RIRM наблюдалось на титаномagnetитсодержащих образцах, а также на порошковых образцах железа и моноклинного пирротина в эпоксидной смоле.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что совокупный эффект облучений SEP (с проникающей способностью до сотен микромет-

ров) и GCR на магнитные свойства внеземного вещества нельзя игнорировать при изучении микрометеоритов, брекчированных метеоритов и реголита, а также любого поверхностного вещества твердых тел солнечной системы. Обнаружение следов SW радиации в метеоритах крайне маловероятно ввиду ограниченной проникающей способности SW протонов в вещество (~нм) и испарения наружной облученной части при абляции метеороида в атмосфере Земли.

Космическая радиация может привести к уменьшению магнитной жесткости Fe⁰-содержащих материалов, увеличению магнитной жесткости магнетитсодержащих материалов и, вероятно, к отсутствию изменений в магнитной жесткости пирротинсодержащих материалов.

Для дальнейшего изучения характерных свойств RIRM (таких, например, как интенсивность, стабильность к температурной чистке) требуются дополнительные радиационные эксперименты. В частности, для того, чтобы оценить возможный вклад RIRM в естественную остаточную намагниченность некоторых метеоритов и образцов лунного грунта, необходимо выяснить, зависит ли интенсивность RIRM от направления и величины напряженности магнитного поля в зоне облучения и может ли RIRM образоваться в практически нулевом магнитном поле.

Авторы выражают благодарность и искреннюю признательность М. Fuller (Гавайский Университет в Маноа, США), Р.А. Садыкову (ИЯИ РАН) и D. Fulvio (Лаборатория атомной физики и физики поверхности, Университет Вирджинии, США) за полезные и ценные замечания к данной работе. Авторы благодарны В. Zanda и М. Gounelle (Национальный Музей Естественной Истории, г. Париж, Франция) за предоставление образцов метеорита *Tatahouine*, использованных в настоящей работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке *Agence Nationale de la Recherche* (project ANR-09-BLAN-4360042), а также за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) Федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А. Абляция метеоритов по данным о распределении космогенных изотопов неона // *Астрономический Вестник*. 2003. № 3. С. 229–239.
- Алексеев В.А. Абляция метеоритов по данным о плотности треков космических лучей // *Астрономический Вестник*. 2004. № 3. С. 225–234.
- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука. 1981. 416 с.

- Дубинин С.Ф., Пархоменко В.Д., Теплоухов С.Г., Гоцкий Б.Н. Аморфизация твердых тел быстрыми нейтронами // *Физика твердого тела*. 1998. № 9. С. 1584–1588.
- Гордон Г.Я. Стабилизация синтетических полимеров. М.: Госхимиздат. 1963. 300 с.
- Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц. М.: УРСС. 2002. 381 с.
- Коптелов Э.А., Латышева Л.Н., Соболевский Н.М., Мустафин Э. Обзор экспериментальных и теоретических работ по облучению полиимидов протонами и ионами. М.: Препринт ИЯИ РАН 1197. 2008. 12 с.
- Тетельбаум Д.И., Менделева Ю.А. Механическая модель аморфизации при ионном облучении // *Физика твердого тела*. 2004. № 11. С. 1960–1963.
- Bernas H., Chaumont J., Cottureau E., Moroy G., Clerc C., Kaitasov O., Ledu D., Salomé M. Progress report on ARAMIS, the 2 MV tandem at Orsay // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*. 1992. V. 62. P. 416–420.
- Binzel R.P., Xu S. Chips off to asteroid 4 Vesta: evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites // *Science*. 1993. V. 260. P. 186–191.
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. Nature and Origins of Meteoritic Breccias. Meteoritics and the Early Solar System II / Ed. by Lauretta D.S. and McSween H.Y. 2006. P. 679–712.
- Brunetto R., Strazzulla G. Elastic collisions in ion irradiation experiments: A mechanism for space weathering of silicates // *Icarus*. 2005. V. 179. P. 265–273.
- Butler R.F., Cox A.V. A Mechanism for Producing Magnetic Remanence in Meteorites and Lunar Samples by Cosmic-Ray Exposure // *Science*. 1971. V. 172. P. 939–941.
- Butler R.F., Cox A.V. The effect of neutron irradiation on remanent magnetization of multidomain iron and kamacite // *J. Geomag. Geoelectr.*, 1974. V. 26. P. 55–71.
- Carpenter R.H. Pyrrhotite isograd in SE Tennessee and SW North Carolina // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1974. V. 85. P. 451–456.
- Cepelch Z., Borovička J., Elford W.G., ReVelle D.O., Hawkes, R.L., Porubčan, V., Šimek M. Meteor phenomena and bodies // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 84(3–4). P. 327–471.
- Consolmagno G.J., Drake M.J. Composition and evolution of the eucrite parent body: evidence from rare earth elements // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1977. V. 41. P. 1271–1282.
- Dekkers M.J. Magnetic properties of natural pyrrhotite part 1: Behavior of initial susceptibility and saturation magnetization related parameters in a grain size dependent framework // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1988. V. 52. P. 376–393.
- Diehl R., Kallenbach R., Parizot E., Von Steiger R. The Astrophysics of Galactic Cosmic Rays // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 99. P. 3–11, doi:10.1023/A:1013882424934.
- Dienes G.J., Vineyard G.H. Radiation effects in Solids. New York: Interscience. 1957. 226 p.
- Eugster O., Herzog G.F., Marti K., Caffee M.W. Irradiation Records, Cosmic-Ray Exposure Ages, and Transfer Time of Meteorites. Meteorites and the Early Solar System II / Edited by Lauretta D.S. and McSween H.Y. 2006. P. 829–851.
- Feigelson E.D., Garmire G.P., Pravdo S.H. Magnetic flaring in the pre-main-sequence Sun and implications for the early Solar System // *Astrophys. J.* 2002. V. 572. P. 335–349.
- Fulvio D., Brunetto R., Vernazza P., Strazzulla G. Space weathering of Vesta and V-type asteroids: new irradiation experiments on HED meteorites // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. P. L11 (1–5), doi: 10.1051/0004-6361/201118486.
- Gattacceca J., Rochette P., Bourot-Denise M. Magnetic properties of a freshly fallen LL ordinary chondrite: the Bensour meteorite // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 140. P. 343–358.
- Gattacceca J., Lamali A., Rochette P., Boustie M., Berthe L. The effect of explosive-driven shocks on the natural remanent magnetization and the magnetic properties of rocks // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2007. V. 162. P. 85–98.
- Gattacceca J., Berthe L., Boustie M., Vadeboin F., Rochette P., De Resseguier T. On the efficiency of shock magnetization processes // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2008a. V. 166. P. 1–10.
- Gattacceca J., Rochette P., Gounelle M., Van Ginneken M. Magnetic anisotropy of HED and Martian meteorites and implications for the crust of Vesta and Mars // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008b. V. 270. P. 280–289, doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.047.
- Goswami J.N., Marhas K.K., Sahijpal S. Did Solar Energetic Particles Produce the Short-lived Nuclides Present in the Early Solar System? // *Astrophys. J.* 2001. V. 549. P. 1151–1159, doi:10.1086/319434.
- Hapke B. Space Weathering from Mercury to the asteroid belt // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106 (E5). P. 10039–10073, doi: 10.1029/2000JE001338.
- Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar sourcebook A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press. 1991. 736 p.
- Herzog G.F. Cosmic-ray exposure ages of meteorites. Treatise on Geochemistry, V. 1: Meteorites, Comets, and Planets / Ed. by Davis A.M. 2005. P. 347–380.
- Holbert K.E. Radiation effects and damage / Dr. Holbert's Course "EEE 598 – Radiation Effects". School of Electrical, Computer and Energy Engineering. Arizona State University. <http://holbert.faculty.asu.edu/eee560/eee560.html>
- Kircher J.F., Bowman R.E. Effects of Radiation on Materials and Components. New York: Reinhold Publishing. 1964. 690 p.
- Lee T., Shu F.H., Shang H., Glassgold A.E., Rehm K.E. Protoplanetary cosmic rays and extinct radioactivities in meteorites // *Astrophys. J.* 1998. V. 506. P. 898–912.
- Néel L. Théorie du traînage magnétique de diffusion // *J. Phys. Rad.* 1952. V. 13. P. 249–263.
- Néel L., Pauleve J., Pauthenet R., Laugier J., Dautreppe A. Magnetic Properties of an Iron-Nickel Single Crystal Ordered by Neutron Bombardment // *J. Applied Geophys.* 1964. V. 35. P. 873–876.
- Pieters C.M., Taylor L.A., Noble S.K., Keller L.P., Hapke B., Morris R.V., Allen C.C., McKay D.S., Wentworth S. Space weathering on airless bodies: resolving a mystery with lunar samples // *Meteorit. Planet. Sci.* 2000. V. 35. P. 1101–1107.
- Preibisch T., Feigelson E.D. The evolution of X-ray emission in young stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005. V. 160. P. 390–400.
- Rochette P., Fillion G., Ballou R., Brunet F., Ouladdiaf B., Hood L. High pressure magnetic transition in pyrrhotite and impact demagnetization on Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2003a. V. 30. P. 1683, doi:10.1029/2003GL017359.
- Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G., Folco L., Gattacceca J., Osete M.L., Pesonen L. Magnetic Clas-

- sification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites // *Meteorit. Planet. Sci.* 20036. V. 38. P. 251–258.
- Rochette P., Gattacceca J., Bonal L., Bourot-Denise M., Chevrier V., Clerc J.-P., Consolmagno G., Folco L., Gounelle M., Kohout T., Pesonen L., Quirico E., Sagnotti L., Skripnik A.* Magnetic Classification of Stony Meteorites: 2. Non-Ordinary Chondrites // *Meteorit. Planet. Sci.* 2008. V. 43. P. 959–980, doi:10.1111/j.1945-5100.2008.tb01092.x.
- Rochette P., Weiss B.P., Gattacceca J.* Magnetism of extra-terrestrial materials // *Elements*. 2009a. V. 5. P. 229–234.
- Rochette P., Gattacceca J., Bourot-Denise M., Consolmagno G., Folco L., Kohout, T., Pesonen L., Sagnotti L.* Magnetic Classification of Stony Meteorites: 3. Achondrites // *Meteorit. Planet. Sci.* 2009b. V. 44. P. 405–427, doi:10.1111/j.1945-5100.2009.tb00741.x.
- Rowe M.W.* Attempted proton-irradiation induced magnetization // *Geochem. J.* 1978. V. 12. P. 195–197.
- Sadykov R.A., Shiryayev A.A., Gavriluk A.G., Seidl T., Mustafafin E., Sadykova I.R., Koptelov E.A.* Nanostructure of Pb ion irradiate Kapton (polyimide) // Book of abstracts of the Rusnanotech – Nanotechnology International Forum 2011, Moscow. 2011.
- Sears D.W.* The origin of chondrules and chondrites. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2004. 209 p.
- Serruys Y., Ruault M.-O., Trocellier P., Henry S., Kaïtasov O., Trouslard Ph.* Multiple ion beam irradiation and implantation: JANNuS project // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 2005. V. 240. P. 124–127.
- Strazzulla G., Dotto E., Binzel R., Brunetto R., Barucci M.A., Blanco A., Orofino V.* Spectral alteration of the Meteorite Epinal (H5) induced by heavy ion irradiation: A simulation of space weathering effects on near-Earth asteroids // *Icarus*. 2005. V. 174. P. 31–35.
- Sugiura N., Strangway D.W.* Magnetic studies of meteorites. Meteorites and the Early Solar System / Edited by Kerridge J.F. and Mathews M.S. 1988. P. 595–615.
- Vernazza P., Brunetto R., Strazzulla G., Fulchignoni M., Rochette P., Meyer-Vernet N., Zouganelis I.* Asteroid colors: a novel tool for magnetic field detection? The case of Vesta // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 451. P. L43–L46, doi: 10.1051/0004-6361:20065176.
- Vernazza P., Binzel R.P., Thomas C.A., DeMeo F.E., Bus S.J., Rivkin A.S., Tokunaga A.T.* Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids // *Nature*. 2008. V. 454. P. 858–860, doi: 10.1038/nature07154.
- Vernazza P., Binzel R.P., Rossi A., Fulchignoni M., Birlan M.* Solar wind as the origin of rapid reddening of asteroid surfaces // *Nature*. 2009. V. 458. P. 993–995, doi: 10.1038/nature07956.
- Weiss B.P., Gattacceca J., Stanley S., Rochette P., Christensen U.R.* Paleomagnetic Records of Meteorites and Early Planetary Differentiation // *Space Science Reviews*. 2010. V. 152. P. 341–390.
- Wolk S.J., Harnden F.R.Jr., Flaccomio E., Micela G., Favata F., Shang H., Feigelson E.D.* Stellar Activity on the Young Suns of Orion: COUP Observations of K5-7 Pre-Main-Sequence Stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2005. V. 160(2). P. 423–449, doi:10.1086/432099.
- Ziegler J.F.* SRIM-2003 // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sec. B.* 2004. V. 219–220. P. 1027–1036, doi:10.1016/j.nimb.2004.01.208.