МИРЭА – Российский Технологический Университет

XXV Международная конференция

Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах

СБОРНИК ТРУДОВ

1 – 6 июля 2024 года

Москва

УДК 537.612.3

ББК 222.234

Си34

Си34 **Новое в магнетизме и магнитных материалах. Сборник трудов XXV Международной конференции 1 – 5 июля 2024 г. – Москва – 2024 – 988 с.**

ISBN 978-5-4465-1869-2

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

МИРЭА – Российский технологический университет.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет.
Подсекция «Физика магнитных пленок и малых частиц» секции «Магнетизм» Научного Совета РАН «Физика конденсированных сред».
Магнитное Общество России (МАГО).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: Сигов Александр Сергеевич
Заместитель председателя: Юрасов Алексей Николаевич
Члены Организационного комитета: Грановский Александр Борисович, Мишина Елена Дмитриевна, Перов Николай Сергеевич, Пятаков Александр Павлович, Фетисов Леонид Юрьевич, Гладышев Игорь Васильевич, Яшин Максим Михайлович.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: Пятаков Александр Павлович
Заместитель председателя: Юрасов Алексей Николаевич
Члены программного комитета:

Бебенин Н.Г.	Исхаков Р.С.	Марченков В.В.	Прудников В.Н.	Усов Н.А.
Белотелов В.И.	Калинин Ю.Е.	Муртазаев А.К.	Розанов К.Н.	Устинов В.В.
Ведяев А.В.	Кокшаров Ю.А.	Мухин А. А.	Родионова В.В.	Фраерман А.А.
Васильев А.Н.	Курляндская Г.В.	Никитин С.А.	Рудой Ю.Г.	Фетисов Ю.К.
Ганьшина Е.А.	Лилеев А.С.	Овчинников С.Г.	Русаков В.С.	Шавров В.Г.
Гиппиус А.А.	Логунов М.В.	Памятных Л.А.	Сапожников М.В.	Шалыгина Е.Е.
Глушков В.В.	Локк Э.Г.	Писарев Р.В.	Смирнов Б.М.	Шапаева Т.Б.
Губин С.П.	Лукашева Е.В.	Покатилов В.С.	Сухоруков Ю.П.	
Звездин А.К.	Любутин И.С.	Поляков П.А.		

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Новые магнитные и родственные им материалы: синтез и физические свойства. Преподавание по разделам «Магнетизм» и «Магнитные материалы» в высшей школе
Председатели: Перов Н.С., Прудников В.Н. и Родионова В.В.

2. Процессы намагничивания и перемагничивания
Председатели: Чеченин Н.Г. и Пятаков А.П.

3. Микромагнетизм и доменная структура
Председатели: Звездин К.А. и Пятаков А.П.

4. Динамические процессы в магнетиках
Председатель: Белотелов В.И.

5. Спиновый транспорт и кинетические эффекты в магнетиках. Элементарные возбуждения и волновые процессы в магнетиках
Председатели: Грановский А.Б., Юрасов А.Н., Рыльков В.В.

6. Резонансные явления в магнетиках
Председатели: Дровосеков А.Б., Сырьев Н.Е., Мухин А.А.

7. Магнитные фазовые переходы и критические явления
Председатели: Муртазаев А.К. и Успенская Л.С.

8. Магнитные пленки и многослойные структуры
Председатели: Калинин Ю.Е. и Юрасов А.Н.

9. Магнитные наноструктуры. Малые магнитные частицы
Председатели: Сапожников М.В., Киселева Т.Ю. и Юрасов А.Н.

10. Магнитооптика и фотомагнетизм
Председатели: Шалыгина Е.Е., Шапаева Т.Б. и Ганьшина Е.А.

11а. Магнитоэлектрические явления в композитных структурах
Председатели: Фетисов Ю.К. и Фетисов Л.Ю.

11б. Магнитоэлектрические явления: кристаллы и однофазные материалы
Председатели: Пятаков А.П. и Гареева З.В.

12. Магнитоакустика и магнитоупругие взаимодействия
Председатели: Котов Л.Н. и Власов В.С.

УДК 537.622; 552.56

Исследование минерального состава Fe-Mn образований вулкана Пюи де Фолль рифтовой долины срединно-атлантического хребта методами криогенной магнитометрии

Сергиенко Е.С.

к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

Янсон С.Ю., к.г.-м.н., зам. директора ресурсного центра, **Аношин Я.В**., студент, **Дубешко Д.Д.,** студент,

Санкт-Петербургский государственный университет

Харитонский П.В., д.ф.-м.н., в.н.с.,

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Гареев К.Г., к.т.н., доцент,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. *Исследован минеральный состав Fe-Mn образований вулкана Пюи де Фолль рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта. Методами магнитометрии выявлено, что вероятными железосодержащими фазами этих образований являются рентгеноаморфный железосодержащий силикатный агрегат и ферригидрит.*

Ключевые слова: *оксигидроксиды железа, криогенная магнитометрия*

Study of the mineral composition of Fe-Mn formations of the Puy des Folles volcano of the rift valley of the mid-atlantic ridge by cryogenic magnetometry methods

Sergienko E.S., Ph. D., assoc. prof., **Yanson S.Yu.,** Ph. D., deputy director of research center, **Anoshin Y.V.**, student, **Dubeshko D.D.**, student,

Saint Petersburg University

Kharitonskii P.V., Dr. Sci., lead. res.,

Ioffe Institute

Gareev K.G., Ph. D., assoc. prof.,

Saint Petersburg Electrotechnical University

Annotation. *The mineral composition of Fe-Mn formations of the Puy des Folles volcano of the rift valley of the Mid-Atlantic Ridge has been studied. The methods of magnetometry revealed that the probable iron-bearing phases of these formations are X-ray amorphous iron-rich silicate matter and ferrihydrite.*

Keywords: *iron oxyhydroxides, cryogenic magnetometry.*

Рифтовые долины срединно-океанических хребтов (СОХ) являются выражением оси спрединга в рельефе океанского дна: в срединных частях СОХ происходит новообразование океанической коры, они характеризуются высокими значениями теплового потока, повышенной сейсмичностью, интенсивным магматизмом и часто высокой гидротермальной активностью. Таким образом, там возникают уникальные условия для образования различных

минеральных ассоциаций и редких минеральных отдельностей. В работе изучены железомарганцевые образования района подводного вулкана Пюи де Фолль рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта (САХ), одного из крупнейших СОХ. Образец размером 15×15×10 см был отобран в 45-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Логачев» при проведении исследований ФГУНПП «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» в пределах российского разведочного региона САХ. Образец представлен рыхлыми образованиями тонковолокнистой структуры, местами с лимонитом. Одной из отличительных особенностей изученных образцов является их относительно небольшой с геологической точки зрения возраст. По оценкам он может соответствовать современному этапу активации гидротермальной деятельности и составлять первые тысячи лет (до 7 тыс. лет) [1]. Таким образом, данное исследование является актуальным, т.к. может позволить реконструировать эволюцию ультрадисперсных железомарганцевых образований от времени формирования до современного состояния.

При изучении структуры, фазового и химического состава образцов использовались следующие методы: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с применением приборов Zeiss Merlin (Zeiss, Германия), QUANTA 200 3D (FEI, США); рентгенофазовый анализ с применением порошкового дифрактометра D2 Phaser (Bruker, США); энергодисперсионная рентгенофлуоресцентная спектрометрия (РФА) с использованием установки EDX-8100P (Shimadzu, Япония). Результаты исследования методом РФА представлены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание химических элементов в образце (масс. %)

Mn	Fe	Si	Cl	Cu	Ca	K	Al	P	Zn	S	Sr
57,5	25,1	9,9	1,9	1,6	1,4	1,1	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1

Рентгенофазовый анализ выявил в составе минералы марганца — бернессит и тодоркит, но не позволил определить железосодержащую фазу. Результаты СЭМ представлены на рис. 1. СЭМ-изображения и данные рентгеноспектрального микроанализа (РСМА, табл. 2) демонстрируют в структуре образца трубчатые футляровидные образования глобулярной структуры, представленные, вероятно, рентгеноаморфным железосодержащим силикатным веществом и оксигидроксидами железа. Однозначно определить видовую принадлежность внутреннего заполнения и самих трубок методами РСМА и РФА не удалось.

Таблица 2. Данные рентгеноспектрального микроанализа в точках, обозначенных на рис. 1 (масс. %)

	O	Na	Si	Cl	Fe	Mg	K	Mn
1	66,66	2,57	9,66	0,99	20,13	–	–	–
2	42,31	1,22	17,17	1,75	37,54	–	–	–
3	61,36	1,83	1,13	0,54	–	0,85	0,60	33,69

Далее были выполнены эксперименты по изучению магнитных свойств образцов при комнатной и криогенных температурах (рис. 2).

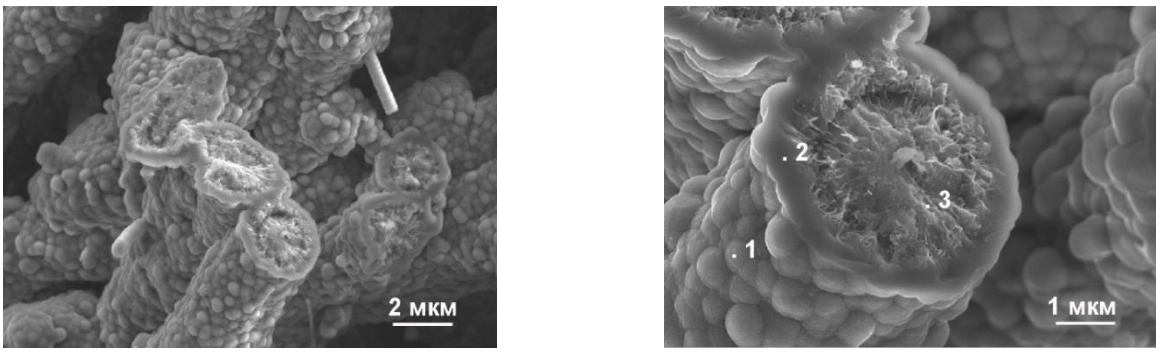

Рис. 1. СЭМ-изображения образца: 1, 2, 3 — точки, в которых производилось определение элементного состава методом РСМА

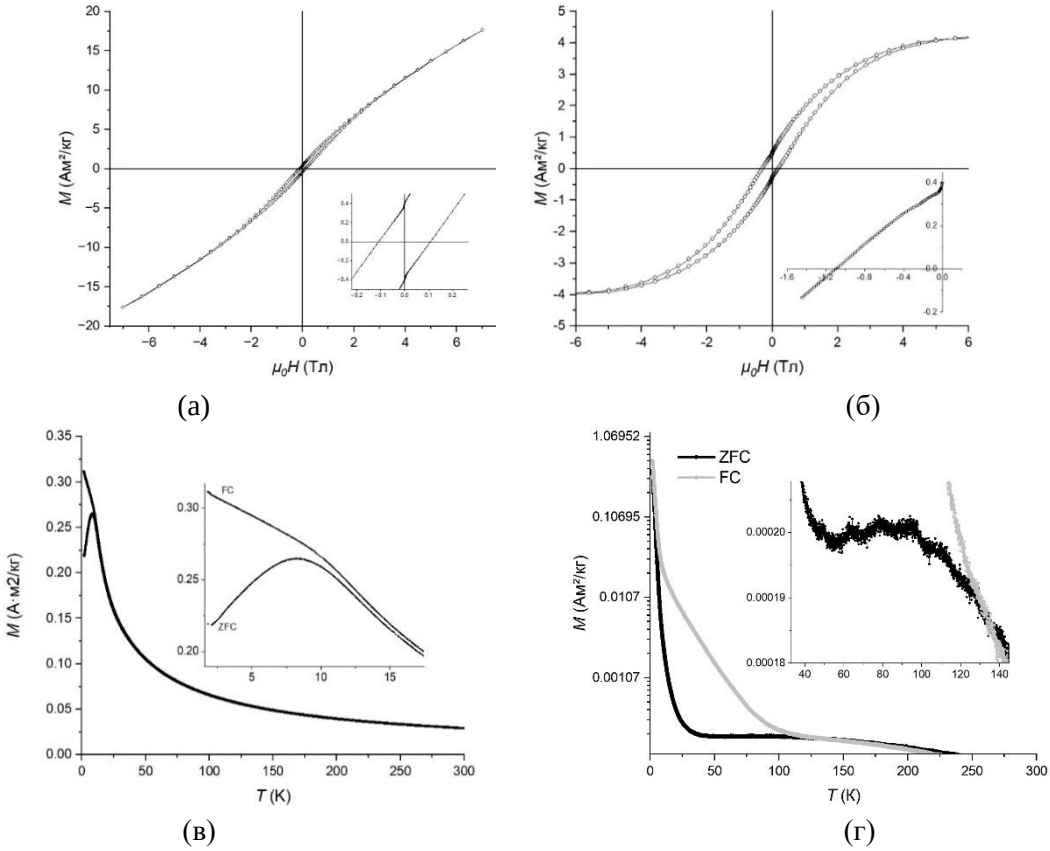

Рис. 2. Результаты магнитометрии: (а) — петля гистерезиса при температуре 2 К, на врезке — центральная часть петли; (б) петля гистерезиса, скорректированная за парамагнетизм, на врезке — кривая размагничивания остаточной намагниченности полем обратного знака; (в, г) — температурные зависимости намагниченности (пояснения в тексте), на врезках — изображения характерных особенностей в увеличенном масштабе

Три вида магнитных измерений были проведены с помощью установки MPMS 3 (Quantum Design, США) в режиме вибрационного магнитометра: 1) построение петель магнитного гистерезиса в максимальном поле 7 Тл при 2 К (рис. 2а, б) и 295 К (результаты приведены в таблице 3); 2) измерение температурной зависимости индуктивной намагниченности в поле 10 мТл в цикле «нагрев–охлаждение» (ZFC–FC) в диапазоне 1,8–300 К (рис. 2в); 3) измерение температурной зависимости остаточной намагниченности, полученной в поле 5 Тл в цикле «нагрев-охлаждение» в диапазоне 1,8–300 К (рис. 2г).

Значения коэрцитивной силы по остаточной намагниченности H_{cr} определялись из кривых разрушения остаточной намагниченности, полученной в поле 5 Тл. Петли гистерезиса демонстрируют значительный вклад парамагнитной компоненты. Скорректированные значения гистерезисных параметров приведены в табл. 3. На гистерезисе при 2 К отмечаются изломы петли (см. вставку на рис. 2а). Кроме того, на кривых ZFC–FC для индуктивной намагниченности определяется фаза с температурой блокировки ~ 8 К. Указанные особенности могут свидетельствовать о присутствии ферригидрита [2]. Значения остаточной намагниченности в диапазоне температур 1,8–12 К уменьшаются на три порядка (рис. 2г), что скорее всего связано с большим количеством суперпарамагнитных частиц в образце. В диапазоне температур 60–80 К отмечается локальный максимум, что возможно, говорит о присутствии в образце еще одной магнитоупорядоченной фазы, предположительно относящейся к агрегатам Fe-Si состава.

Таблица 3. Параметры магнитного гистерезиса при температуре 2 К и 295 К

Температура, К	$\mu_0 H_c$, мТл	$\mu_0 H_{cr}$, мТл	M_s, А·м^2/кг	M_{rs}, А·м^2/кг
2	104,0	1100,0	3,1	0,4
295	0,1	230,0	2,9	$4{,}0\cdot10^{-5}$

Сопоставление полученных результатов и литературных данных (см., например, [2, 3]) позволяет предположить, что железосодержащими фазами Fe-Mn образований района подводного вулкана Пюи де Фолль рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта являются рентгеноаморфный железосодержащий силикатный агрегат и ферригидрит. Они представлены мелкодисперсными частицами, в основном в суперпарамагнитном состоянии, и их кластерами. Большие значения H_{cr} при криогенных температурах возможно связаны с блокировкой магнитных моментов частиц, образующих цепочки.

Благодарности. Работы выполнены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ: «Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники»; «Нанотехнологии»; «Микроскопии и микроанализа»; «Рентгенодифракционные методы исследования», «Инновационные технологии композитных наноматериалов».

Список использованных источников:

1. Кузнецов В. Ю., Черкашев Г. А., Леш А. Ю., Бельтенев В. Е., Максимов Ф. Е., Шилов В. В., Тарасенко Д. И. Возраст гидротермальных руд Срединно-Атлантического хребта (по данным 230Th/U-датирования) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2007. – Т. 2. – С. 91-99.

2. Balaev D. A., Krasikov A. A., Dubrovskii A. A., Semenov S. V., Bayukov O. A., Stolyar S. V., Iskhakov R. S., Ladygina V. P., Ishchenko L. A. Magnetic Properties and the Mechanism of Formation of the Uncompensated Magnetic Moment of Antiferromagnetic Ferrihydrite Nanoparticles of a Bacterial Origin // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2014. V. 119(3). P. 479–487.

3. Mills R. A., Wells D. M., Roberts S. Genesis of ferromanganese crusts from the TAG hydrothermal field // Chemical geology. –2001. – V. 176(1-4). – P. 283-293.