

МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЮВИТОВ ИМПАКТНОГО КРАТЕРА ЖАМАНШИН

© 2025 г. П. В. Харитонский¹, Е. А. Сетров², А. Ю. Ралин³,
Е. С. Сергиенко^{1,4}, К. Г. Гареев^{1,2,*}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

*E-mail: kggareev@etu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2024 г.

После доработки 14.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

На основе согласованного теоретического моделирования с использованием двух независимых моделей, учитывающих возможную химическую неоднородность частиц и магнитостатическое взаимодействие между ними, рассчитаны гистерезисные характеристики и концентрации ферромагнитного материала в образцах зювитов импактного кратера Жаманшин, соответствующие экспериментальным данным.

Ключевые слова: зювиты, микромагнитное моделирование, двухфазные частицы, магнитостатическое взаимодействие, суперпарамагнетизм, частотно-зависимая восприимчивость, наночастица, магнитометрия, магнетит, маггемит, гематит.

DOI: 10.31857/S0367676525040015, EDN: GSQUJI

ВВЕДЕНИЕ

Микромагнетизм – это макроскопическая теория, описывающая процессы намагничивания на масштабах длины в диапазоне от нескольких нанометров и более, когда можно не учитывать дискретность спинов и считать намагниченность непрерывной функцией координат. Благодаря этому можно сократить количество расчетов за счет замены учета огромного количества спинов на существенно меньшее количество конечных элементов. Теория микромагнетизма началась со статьи Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [1], в которой впервые был предложен принцип минимизации полной свободной магнитной энергии. Детально принципы микромагнетизма изложены в работах У. Ф. Брауна (см., например, [2]). В настоящее время существует большое количество программных пакетов, например, таких как «OOMMF» [3], «mutax³» [4] и «Fidimag» [5], предназначенных для решения обширного класса задач микромагнетизма [6].

Авторами настоящей статьи ранее были разработаны две независимые микромагнитные модели: модель однодоменных частиц с эффективной спонтанной намагниченностью (ОДЭН) [7, 8] и модель двухфазных химически неоднородных частиц (ДФ) [9, 10], на основе которых были созданы программы для микромагнитного моделирования [11, 12]. Данные модели успешно прошли верификацию на различных природных и искусственных объектах (см., например, [13–19]). Основным преимуществом обеих моделей является ускорение расчетов, поскольку практически все сложные для вычислений выражения рассчитаны аналитически в общем виде [7, 9, 20].

В настоящей работе объектом микромагнитного моделирования являются зювиты, представляющие собой разновидность горных пород импактного происхождения, возникших в результате высокоскоростного соударения Земли с малым космическим телом. В отличие от других ударных пород, таких как литические брекчии или импактные стекла (см., например, [21]), зю-

виты представляют собой полимиктовые брекчи, содержащие смесь обломочного материала и фрагменты расплавленных горных пород мишени (до 10–15% и больше) [22, 23, 17].

Ударная структура Жаманшин расположена в Северном Приаралье (Казахстане, 48.37° с.ш., 60.94° в.д.), диаметр доэрозионного периода ~13.5 км, возраст – 0.91 ± 0.14 млн лет [24]. Ранее было показано, что импактиты Жаманшина (иргизиты, жаманшиниты, тагамиты и зювиты) в географически различных частях кратера различаются по текстуре и химическому составу, что свидетельствует об отсутствии глобального перемещения пород мишени во время ударного события [25].

В работе [17] исследовались магнитные свойства четырех образцов зювитов из импактной структуры Жаманшин: три из восточной части кратера (образцы ZSU-1, ZSU-2 и ZSU-3) и один из северной (образец 17-135). Были проведены теоретические расчеты гистерезисных характеристик с использованием модели магнитостатически взаимодействующих однодоменных частиц с эффективной спонтанной намагниченностью. Это позволило выявить несколько особенностей исследованных объектов, включая химическую неоднородность и кластерное распределение частиц оксидов железа, и показать, что магнитная вязкость образцов зювитов в основном обеспечивается частицами в суперпарамагнитном состоянии.

Целью настоящей работы является согласованное моделирование гистерезисных характеристик этих же образцов зювитов на основе модели ДФ и модифицированной модели ОДЭН [26]. Под согласованным моделированием подразумевается теоретический расчет гистерезисных характеристик образцов по двум независимым моделям с учетом экспериментальных данных: размеры и массы образцов, намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и коэрцитивная сила по остаточной намагниченности, структурный и фазовый состав.

ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В работах [16, 27] для описания магнитных состояний химически неоднородных частиц использовалась модель двухфазных магнитостатически взаимодействующих частиц. Рассматривался ансамбль кубических частиц с характерным размером a и объемами фаз: $(1 - \epsilon)a^3$ – «сильномагнитная» фаза и ϵa^3 – «слабомагнитная» фаза. Оси легкого намагничивания фаз считались параллельными межфазной границе. Тогда в отсутствие внешнего поля магнитные моменты в фазах либо противоположны по направлению, либо их направления совпадают. Приложение внешнего поля параллельно легким осям не увеличивает число возможных магнитных со-

стояний, но изменяет их относительные доли. В рамках модели ДФ можно рассчитать поля перемагничивания частиц и оценить гистерезисные характеристики образца в приближении равномерного распределения случайных полей взаимодействия.

Магнитостатическое взаимодействие даже при небольших объемных концентрациях ферромагнетика ($\approx 1\%$) может существенно влиять на процессы намагничивания [28]. Это тем более важно при неоднородном (кластерном) распределении частиц в образце, когда концентрация частиц в кластерах может быть значительно выше. Кроме того, взаимодействие приводит к блокированию магнитных моментов части суперпарамагнитных частиц, которые могут вносить вклад в остаточную намагниченность (см., например, [29]). Следовательно, необходимо учитывать параметры взаимодействия более строго, например, используя приближение среднего поля, для которого рассчитаны функции распределения случайных полей [7].

Введя понятие эффективной спонтанной намагниченности I_{eff} , которое позволяет феноменологически учесть магнитную и химическую неоднородность частиц, можно рассмотреть ансамбль условно «однодоменных» магнитостатически взаимодействующих частиц. В работах [14, 30] авторами статьи была проведена верификация модели ОДЭН для ансамбля синтезированных частиц состава «магнетит-титаномагнетит».

Для композитов состава «магнетит-титаномагнетит» были проведены согласованные расчеты гистерезисных характеристик с использованием обеих моделей ДФ и ОДЭН [31]. Это позволило, с одной стороны, учесть химическую неоднородность отдельных частиц и рассчитать их поля перемагничивания, а с другой стороны, более строго оценить влияние магнитостатического взаимодействия между частицами на процессы намагничивания. Применяя аналогичный подход с использованием модифицированной модели ОДЭН, рассчитаем гистерезисные характеристики образцов зювитов.

Экспериментальные данные для рассматриваемых образцов включают в себя [24]: 1) величины удельного магнитного момента насыщения M_s , остаточного удельного момента насыщения M_{rs} , коэрцитивной силы H_c и коэрцитивной силы по остаточной намагниченности H_{cr} , полученные при комнатной температуре на вибрационном магнитометре LakeShore 7410 (Lake Shore Cryotronics Inc., США) в максимальном поле 1.8 Тл (табл. 1); 2) величины магнитной восприимчивости χ на трех рабочих частотах (976, 3904 и 15616 Гц), измеренные с использованием моста восприимчивости MFK-1FA (AGICO, Чехия).

Таблица 1. Гистерезисные характеристики и величины FD-фактора образцов

Образец	M_s , эме/г	M_{rs} , эме/г	H_c , Э	H_{cr} , Э	M_{rs}/M_s	H_{cr}/H_c	fd , %
ZSU-1	0.71	0.11	139	318	0.16	2.3	10
ZSU-2	1.64	0.43	221	409	0.26	1.8	23
ZSU3	1.98	0.39	124	243	0.19	2.0	1
17-135	1.39	0.42	349	657	0.31	1.9	5

Таблица 2. Расчеты объемных долей C и средних размеров d_{mean} , соответствующих значениям fd в интервале от 0.5 до 23% ($C_{SP} = fd$), где M – математическое ожидание логнормального распределения

M	2.61	2.31	1.95	1.37	0.79	0.14	0.06
C_{SP} , %	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	23.0
C_{bSP} , %	6.1	8.1	10.3	13.4	14.7	12.9	11.9
C_{SD} , %	44.7	44.1	42.5	38.1	32.0	22.2	19.6
C_{PSD} , %	48.6	46.6	44.7	42.3	40.0	34.2	31.8
C_{MD} , %	0.1	0.2	0.4	1.3	3.4	10.8	13.6
d_{mean} , нм	34	33	31	28	23	13	10

Известно, что наличие частотной зависимости магнитной восприимчивости χ указывает на присутствие суперпарамагнитных частиц в образцах и позволяет оценить максимально возможные значения доли этих частиц (см., например, [32, 33]). Используя значения магнитной восприимчивости на верхней χ_h и нижней частотах χ_l в слабом поле, можно рассчитать величину FD-фактора (Frequency Dependence), значение которого fd (табл. 1) коррелирует с долей суперпарамагнитных частиц в ферромагнитной фракции образца [15, 34]:

$$fd = \frac{\chi_l - \chi_h}{\chi_l \lg(f_h/f_l)} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Значения магнитогранулометрических отношений M_{rs}/M_s и H_{cr}/H_c показывают, что в основном частицы находятся в одно- и малодоменном состоянии [35]. В то же время, значение FD-фактора показывает, что в образцах присутствует фракция, соответствующая истинно суперпарамагнитным частицам.

В модели ОДЭН, используя логнормальное распределение частиц по объему [35, 36] и задавая диапазоны размеров частиц в различных магнитных состояниях [15], можно рассчитать доли и средние размеры частиц в выбранных диапазонах. Плотность вероятности логнормального распределения записывается как:

$$\varphi(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x/\alpha))^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где $x = v/v_p$ – отношение объема частицы к среднему объему, σ – стандартное отклонение и α – среднее значение соответствующего распределения Гаусса. При моделировании рассматривают-

ся пять диапазонов размеров зерен, соответствующие разным магнитным состояниям: истинно суперпарамагнитные (SP), заблокированные суперпарамагнитные (bSP), однодоменные (SD), псевдооднодоменные (PSD) и многодоменные (MD) частицы с соответствующими диаметрами частиц приблизительно в интервалах 0–18, 18–25, 25–40, 40–100 и 100–500 нм. Максимально возможное содержание частиц в истинно суперпарамагнитном состоянии составляет от нескольких до десятков процентов (см. значение fd в табл. 1)

Введем относительные доли частиц, соответствующие указанным выше магнитным состояниям: n_{sp} , n_{bsp} , n_{sd} , n_{psd} и n_{md} . Относительная доля каждой группы записывается как:

$$n = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx / \int_{x_{min}}^{x_{max}} \varphi(x) dx, \quad (3)$$

где x_1 и x_2 – нижняя и верхняя границы диапазона объемов данной группы частиц соответственно, $x_{min}(d = 0)$ и $x_{max}(d = 500 \text{ нм})$ – минимальный и максимальный относительные объемы частиц соответственно. В табл. 2 приведены относительные вклады частиц в различных магнитных состояниях в объемную концентрацию ферромагнетика образца, соответствующие различным возможным значениям FD-фактора и, следовательно, различным средним значениям размера частиц d_{mean} . Наилучшее согласие с экспериментальными данными было получено для характерного размера частицы $d_p = 25 \text{ нм}$ (соответствует безразмерному математическому ожиданию $M = 1$) и достаточно узкого распределения с безразмерным среднеквадратическим отклонением, равным 3.

Используя результаты табл. 2, были проведены согласованные расчеты по двум моделям ДФ

и ОДЭН. Исходя из экспериментальных значений M_s и M_{rs} и предполагаемого состава частиц, в модели ОДЭН задается предварительный диапазон значений эффективной спонтанной намагниченности насыщения $I_{s\text{ eff}}$ и рассчитываются объемная концентрация ферритмагнетика C_f и эффективная спонтанная намагниченность $I_{rs\text{ eff}}$ по остаточной намагниченности с учетом максимального значения FD-фактора для каждого образца. А в модели ДФ рассчитываются поля перемагничивания H_0 частиц того же состава, соответствующие экспериментальным значениям коэрцитивной силы по остаточной намагниченности H_{cr} , что позволяет связать величину fd со степенью окисления ϵ через средний размер частицы d_{mean} . В обеих моделях частицы считаются кристаллографически одноосными, т.е. $H_0 = 2K_u/I_s$, где K_u – эффективная константа кристаллографической анизотропии, I_s – спонтанная намагниченность частицы (фазы).

В табл. 3 приведены результаты моделирования, соответствующие предполагаемому составу двухфазных частиц типа «магнетит/маггемит–гематит».

Сравнительный анализ полученных значений $I_{s\text{ eff}}$ и $I_{rs\text{ eff}}$ (табл. 3) с учетом приближения $H_0 = H_{cr}$ и соответствующих значений спонтанных намагниченностей и констант анизотропии магнетита ($I_s = 480$ эме/см³, $K_u = 1.3 \times 10^5$ эрг/см³), маггемита ($I_s = 390$ эме/см³, $K_u = 4.6 \times 10^4$ эрг/см³)

и гематита ($I_s = 3$ эме/см³, $K_u = 4 \times 10^4$ эрг/см³) [37, 38] позволяет сделать выводы о вероятном химическом составе и магнитном состоянии частиц. Образцы ZSU-1 и ZSU-3 содержат частицы ближе к составу «маггемит–гематит», а образцы ZSU-2 и 17-135 – «магнетит–гематит». Во всех образцах основной вклад в магнитные свойства дают однодоменные и псевдооднодоменные химически неоднородные частицы. Наиболее заметная фракция суперпарамагнитных частиц присутствует в образце ZSU-2 (порядка 25–35%), что проявляется в существенном занижении среднего размера частиц (см. табл. 2 и 3). Объемная концентрация ферритмагнетика в образцах имеет порядок 10^{-3} – 10^{-2} , а концентрация суперпарамагнитной фракции находится в диапазоне 10^{-5} – 10^{-4} (см. табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами выполнено согласованное теоретическое моделирование гистерезисных характеристик зювитов импактного кратера Жаманшин на основе двух независимых микромагнитных моделей, учитывающих возможную химическую и магнитную неоднородность частиц, а также магнитостатическое взаимодействие между ними. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Подход с использованием частотной зависимости магнитной восприимчивости позволяет оценить концентрации суперпарамагнитной

Таблица 3. Результаты расчета эффективной спонтанной намагниченности насыщения $I_{s\text{ eff}}$, эффективной спонтанной намагниченности $I_{rs\text{ eff}}$ по остаточной намагниченности и объемной концентрации ферритмагнетика C_f в образце по двум моделям. Выделены строки с наилучшим согласованием по двум моделям

Образец	Модель	fd (в %) / ϵ	$I_{s\text{ eff}}$, эме/см ³	$I_{rs\text{ eff}}$, эме/см ³	$C_f, 10^{-3}$
ZSU-1	ОДЭН	2–10%	200	33–36	5.6
			300	49–54	3.7
			400	66–72	2.8
	ДФ	0.35–0.45	206–248	38–42	4.5–5.5
ZSU-2	ОДЭН	7–23%	200	59–71	12.5
			300	88–106	8.3
			400	117–142	6.2
	ДФ	0.01–0.35	312–475	114–152	5.3–8.0
ZSU-3	ОДЭН	0.1–1%	200	40	15.4
			300	60	10.3
			400	80–81	7.7
	ДФ	0.01–0.13	331–376	69–77	8.2–9.3
17-135	ОДЭН	1–5%	200	63–66	11.8
			300	95–99	7.8
			400	127–132	5.9
	ДФ	0.46–0.58	203–260	69–85	9.1–11.6

фракции в образцах, соответствующие значениям FD-фактора. Хотя объемная концентрация суперпарамагнитных частиц в образцах невелика (порядка 10^{-5} – 10^{-4}), но ее учет при моделировании дает возможность установить параметры логнормального распределения частиц по объемам и предполагаемое распределение частиц по магнитным состояниям.

Сравнительный анализ полученных значений эффективных спонтанных намагниченностей и полей перемагничивания позволил сделать выводы о химическом составе (магнетит–гематит, маггемит–гематит) и магнитном состоянии частиц (преимущественно однодоменные и псевдооднодоменные), а также определить объемные концентрации ферромагнетика в образцах.

Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ: «Геомодель», «Инновационные технологии композитных наноматериалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. // Phys. Z. Sowjetunion. 1935. V. 8. No. 1. P. 153.
2. Браун У.Ф. Микромагнетизм. М.: Наука, 1979. 159 с.
3. <https://math.nist.gov/oommf/doc/userguide20b0/userguide.pdf>.
4. <https://mumax.github.io>.
5. <https://github.com/computationalmodelling/fidimag>.
6. Leliaert J., Mulkers J. // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. No. 18. Art. No. 180901.
7. Альмиев А.С., Ралин А.Ю., Харитонский П.В. // ФММ. 1994. Т. 78. № 1. С. 28; Al'miev A.S., Ralin A.Yu., Kharitonskij P.V. // Phys. Metals. Metallogr. 1994. V. 78. No. 1. P. 16.
8. Игнатьев А.Р., Харитонский П.В. // Поверхность. 1996. № 6. С. 68.
9. Ралин А.Ю., Харитонский П.В. // ФММ. 1994. Т. 78. № 3. С. 38; Ralin A.Yu., Kharitonskij P.V. // Phys. Metals. Metallogr. 1994. V. 78. No. 3. P. 34.
10. Афремов Л.Л., Ралин А.Ю., Харитонский П.В. // Изв. РАН. Физ. Земли. 1995. № 6. С. 80; Afremov L.L., Ralin A.Yu., Kharitonskiy P.V. // Izv. Phys. Solid Earth. 1996. V. 31. P. 533.
11. Харитонский П.В., Сетров Е.А., Шейдаев Т.С. Микромагнитное моделирование ансамблей двухфазных химически неоднородных наночастиц с бесконечно тонкой межфазной границей. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2023666690. 2023.
12. Харитонский П.В., Сетров Е.А., Ралин А.Ю. Моделирование магнитных гистерезисных характеристик на основе модели магнитостатически взаимодействующих частиц с эффективной спонтанной намагниченностью. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2024660027. 2024.
13. Харитонский П.В., Фролов А.М., Руднев В.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 10. С. 1465; Kharitonskii P.V., Frolov A.M., Rudnev V.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. V. 74. No. 10. P. 1404.
14. Kharitonskii P., Kirillova S., Gareev K. et al. // IEEE Trans. Magn. 2020. V. 56. Art. No. 7200209.
15. Kharitonskii P., Bobrov N., Gareev K. et al. // J. Magn. Mater. 2022. V. 553. Art. No. 169279.
16. Kharitonskii P., Zolotov N., Kirillova S. et al. // Chinese J. Phys. 2022. V. 78. P. 271.
17. Bobrov N.Yu., Sergienko E.S., Yanson S.Yu. et al. // In: International Conference and School – Problems of Geocosmos. Chapter 7. Cham: Springer, 2023. P. 1.
18. Kharitonskii P., Sergienko E., Ralin A. et al. // Magnetochemistry. 2023. V. 9. No. 10. Art. No. 220.
19. Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Гареев К.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 4. С. 609; Sergienko E.S., Janson S.Yu., Gareev K.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 4. P. 523.
20. Харитонский П.В., Фролов А.М. // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 3–2. С. 197.
21. Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Костеров А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 11. С. 1446; Sergienko E.S., Janson S.Y., Kostero A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 11. P. 1317.
22. Фельдман В.И., Глазовская Л.И. Импаکتитогенез: учебное пособие. М.: Книжный дом «Университет», 2018. 151 с.
23. Siegert S., Hecht L. // Meteorit. Planet. Sci. 2019. V. 54. No. 10. P. 2409.
24. Schmiieder M., Kring D.A. // Astrobiology. 2020. V. 20. No. 1. P. 91.
25. Sergienko E.S., Yanson S.Yu., Kostero A. et al. // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2021. V. 666. Art. No. 042080.
26. Kharitonskii P.V., Setrov E.A., Ralin A.Yu. // Mater. Phys. Mech. 2024. V. 52. No. 2. P. 142.
27. Харитонский П.В., Аникиева Ю.А., Золотов Н.А. и др. // ФТТ. 2022. Т. 64. № 9. С. 1323.
28. Шербаков В.П. // ФММ. 1979. Т. 48. № 6. С. 1134.
29. Афремов Л.Л., Белоконь В.И., Харитонский П.В. // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1988. №5. С.116.
30. Харитонский П.В., Костеров А.А., Гурьев А.К. и др. // ФТТ. 2020. Т. 62. № 9. С. 1527; Kharitonskii P.V., Kostero A.A., Gurylev A.K. et al. // Phys. Sol. State. 2020. V. 62. P. 1691.
31. Харитонский П.В., Гареев К.Г., Ралин А.Ю., Сергиенко Е.С. // ФММ. 2023. Т. 124. № 1. С. 49; Kharitonskii P.V., Gareev K.G., Ralin A.Yu., Sergienko E.S. // Phys. Metals. Metallogr. 2023. V. 124. No. 1. P. 46.
32. Eyre J.K. // Geophys. J. Int. 1997. V. 129. No. 1. P. 209.
33. Egli R. // Geophys. J. Int. 2009. V. 177. No. 2. P. 395.
34. Dearing J.A., Dann R.J.L., Hay K. et al. // Geophys. J. Int. 1996. V. 124. No. 1. P. 228.
35. Kirshvink J.L. Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms. A New Biomagnetism. N.Y.: Plenum Press, 1985. 287 p.
36. Fujihara A., Tanimoto S., Yamamoto H., Ohtsuki T. // J. Phys. Soc. Japan. 2018. V. 87. No. 3. Art. No. 034001.
37. Багин В.И., Гендлер Т.С., Авилова Т.Е. Магнетизм α -окислов и гидроокислов железа. М.: ИФЗ АН СССР, 1988. 180 с.
38. Dunlop D.J., Ozdemir O. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 573 p.

Micromagnetic modeling of hysteresis characteristics of suevites of the Zhamanshin impact crater

P. V. Kharitonskii^a, E. A. Setrov^b, A. Yu. Ralin^c, E. S. Sergienko^{a,d}, K. G. Gareev^{a,b,*}

^aIoffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia

^bSt. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022 Russia

^cFar Eastern Federal University, Vladivostok, 690922 Russia

^dSt. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

**e-mail: kggareev@etu.ru*

On the basis of coordinated theoretical modelling using two independent models that take into account possible chemical inhomogeneity of particles and magnetostatic interaction between them, we calculated the hysteresis characteristics of suevites of the impact crater Zhamanshin corresponding to the experimental data and estimated the concentrations of ferrimagnetic particles in the samples.

Keywords: suevites, micromagnetic modeling, two-phase particles, magnetostatic interaction, superparamagnetism, frequency-dependent susceptibility, nanoparticle, magnetometry, magnetite, maghemite, hematite