

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2013 г. Н. С. Безаева\*, Д. Д. Бадюков\*\*, М. А. Назаров\*\*,  
П. Рошетт\*\*\*, Дж. Фейнберг\*\*\*\*, \*\*\*\*\*

\*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет, кафедра физики Земли  
119991 Москва, Ленинские горы  
e-mail: bezaeva@physics.msu.ru

\*\*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
119991 ГСП-1 Москва, ул. Косыгина, 19  
e-mail: badyukov@geokhi.ru, nazarov@geokhi.ru

\*\*\*CEREGE CNRS/Aix-Marseille Université, BP 80, 13545 Aix en Provence, Cedex 4, France  
e-mail: rochette@cerege.fr

\*\*\*\*Institute for Rock Magnetism, University of Minnesota, 100 Union Drive SE,  
Minneapolis, MN 55455, United States  
e-mail: feinberg@umn.edu

\*\*\*\*\*Department of Earth Sciences, University of Minnesota, 310 Pillsbury Drive SE,  
Minneapolis, MN 55455, United States

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

В настоящей работе проведено изучение распределения магнитной восприимчивости  $\chi_0$  фрагментов обыкновенного хондрита Челябинск (LL5, S4, W0, падение от 15 февраля 2013 г.) из коллекции ГЕОХИ РАН, а также приводится стандартная магнитная характеристика метеоритного вещества, включающая термомагнитный анализ, исследования естественной остаточной намагниченности NRM и остаточной намагниченности насыщения SIRM, а также спектров их размагничивания в переменных магнитных полях с амплитудой до 170 мТл; измерение петель гистерезиса и остаточной коэрцитивной силы  $B_{cr}$  в температурном диапазоне от 10 К до 700°C и др. Для светлой (основной) компоненты метеоритного вещества и ударно-расплавной брекчи средние значения  $\lg\chi_0$  по коллекции составляют  $4.54 \pm 0.10$  ( $n = 66$ ) и  $4.65 \pm 0.09$  ( $n = 38$ ) ( $\times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг), соответственно. Согласно международной магнитной классификации метеоритов, метеорит Челябинск попадает в диапазон LL5 хондритов. Оценки среднего содержания металла по намагниченности насыщения  $M_s$  в светлой и темной компонентах составляют 3.7 мас. % и 4.1 мас. %, соответственно. Таким образом, темная компонента богаче металлом. При комнатной температуре зерна металла являются многодоменными и характеризуются низкими значениями коэрцитивной силы  $B_c$  (<2 мТл) и остаточной коэрцитивной силы  $B_{cr}$  (15–23 мТл). Термомагнитный анализ образцов показал, что основными носителями магнитных свойств метеорита Челябинск в температурном диапазоне >75 К являются тэнит и камасит. В температурном диапазоне ниже 75 К магнитные свойства определяются хромитом; магнитная жесткость образцов максимальна при 10 К и составляет 606 мТл для светлой компоненты и 157 мТл для темной компоненты.

**Ключевые слова:** магнитные свойства, метеорит Челябинск, обыкновенные хондриты.

DOI: 10.7868/S001675251307008X

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитные свойства метеоритов эффективно используются для их классификации [1–3] и имеют принципиальное значение для понимания природы магнитных полей на ранних этапах истории Солнечной системы.

На сегодняшний день собрана и опубликована расширенная систематическая база данных по магнитной восприимчивости  $\chi_0$  каменных метеоритов, в которую вошли тысячи образцов разных типов, хранящихся в основных метеоритных коллекциях мира (обыкновенные хондриты [1], дру-

гие хондриты [2], ахондриты [3]). Созданная база уже многократно успешно использовалась как инструмент для быстрой классификации метеоритов [4], а также оперативного обнаружения ошибок в их классификации [5]. Магнитная классификация метеоритов по  $\chi_0$  удобна и информативна в связи с тем, что, во-первых, измерения  $\chi_0$  являются быстрыми (несколько секунд на измерение) и неразрушающими (см. ниже); во-вторых, измерители магнитной восприимчивости являются широко распространенными, а существование их портативных версий делает возможным их применение непосредственно в полевых

условиях; в-третьих, величина  $\lg \chi_0$  имеет минимальную дисперсию для метеоритов одного и того же типа.

Проведение полного спектра магнитных измерений позволяет получить независимые оценки содержания ферромагнитных минералов в веществе и выяснить их детальные магнитные свойства. В связи с этим нами были изучены экземпляры Челябинского метеоритного дождя с целью измерения их магнитной восприимчивости и получения полных магнитных характеристик, таких как естественная остаточная намагниченность NRM (от англ. “Natural Remanent Magnetization”), остаточная намагниченность насыщения SIRM (от англ. “Saturation Isothermal Remanent Magnetization”) и спектры их размагничивания в переменных магнитных полях, а также параметры петель гистерезиса (намагниченность насыщения  $M_s$ , остаточная намагниченность насыщения  $M_{rs}$ , коэрцитивная сила  $B_c$ ) и остаточная коэрцитивная сила  $B_{cr}$  (отражающая магнитную жесткость образцов), характерные точки Кюри или точки фазовых переходов  $\alpha \rightarrow \gamma$  (далее  $t_c$ ) доминирующих магнитных фаз и характерный размер металлических зерен.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Описание образцов*

В результате работ по сбору выпавшего метеоритного вещества, проведенных сотрудниками лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН в районе поселков Депутатский, Первомайский и Еманжелинка примерно в 40 км к юго-западу от Челябинска, в метеоритную коллекцию РАН поступило 464 метеоритных фрагмента общей массой более 3.5 кг. Среди собранных фрагментов установлены две компоненты: светлая, доминирующая (2/3 образцов) и представляющая собой обыкновенный хондрит LL5 с тонкими прожилками ударного расплава, и темная – фрагменты ударно-расплавной брекчии. По химическому составу светлая и темная компоненты почти не отличаются. Ударная стадия хондрита Челябинск – S4 (30–35 ГПа [6]). Температура термального метаморфизма по оливин-хромитовому термометру оценивается в 680°C. Средняя плотность обыкновенных хондритов типа LL составляет 3.3 г/см<sup>3</sup> с учетом пористости и 3.55 г/см<sup>3</sup> без учета пористости [7].

Проведенные исследования образцов хондрита Челябинск выявили в его составе следующие (типичные для хондритов) минералы, представляющие интерес с точки зрения интерпретации магнитных свойств: хромит, троилит (FeS) и Fe–Ni сплавы: камасит ( $\alpha$ -фаза, объемноцентрированная кубическая решетка, далее оцк; Ni  $\leq$  7%) и тэнит ( $\gamma$ -фаза, гранецентрированная кубическая решетка, далее гцк; Ni  $\geq$  7%). При этом средний со-

став камасита – 5.15 мас. % Ni, 1.8 мас. % Co, а тэнита – 35.3 мас. % Ni; 0.86 мас. % Co. По предварительным данным доля камасита в металле составляет 20 мас. % а тэнита, соответственно, 80 мас. %.

Для определения распределения магнитной восприимчивости изучено 104 фрагмента метеорита Челябинск с массой более 3 г. В работе [1] указано, что вклад коры плавления в  $\chi_0$  пренебрежимо мал для образцов с массой 3 г (~1 см<sup>3</sup>) и выше (в связи с ее малым объемным соотношением по отношению к основному метеоритному веществу). Поэтому в настоящей работе для исследования распределения  $\chi_0$  из коллекции выбирались именно такие фрагменты. При этом в изученной выборке 66 образцов представлены светлой компонентой и 38 образцов – ударно-расплавной брекчией.

Для более детальных магнитных исследований (см. ниже) были использованы два образца, полностью покрытые корой плавления: образец 11–12 (10.4 г), состоящий из светлой компоненты, и образец 10–126 (7.8 г) – ударно-расплавной брекчии. Эти образцы были распилены на более мелкие фрагменты с использованием низкоскоростной пилы с водяным охлаждением, после чего с помощью микробора Dremel и специальной круговой насадки с них была удалена кора плавления (на нескольких образцах кора плавления была сохранена для сравнения, таблица). Изучаемые образцы были получены из центральных частей фрагментов метеорита, для чего сначала фрагменты распиливались на пластины, которые далее распиливались на кубики и образцы нерегулярной формы (для образцов с боковой части). Массы образцов приведены в таблице.

### *Описание оборудования и методов исследования*

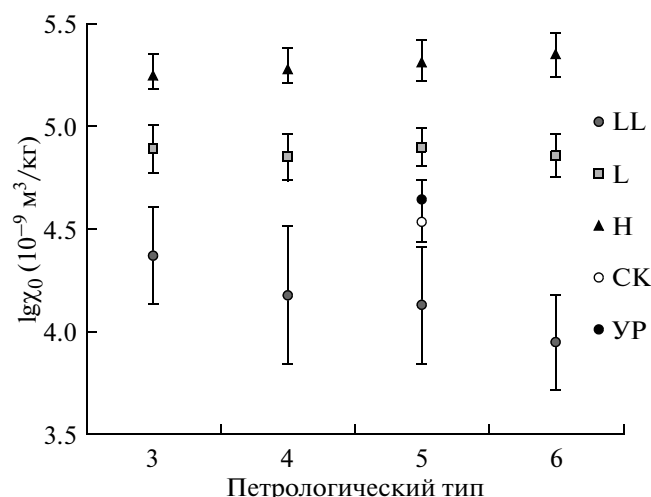
Измерения магнитной восприимчивости  $\chi_0$  фрагментов метеорита Челябинск были проведены в ГЕОХИ РАН при использовании измерителя магнитной восприимчивости ИМВО-М производства ФГУНПП “Геологоразведка” (Россия). С целью усреднения анизотропии вещества для каждого образца проводилось три измерения  $\chi_0$  с пространственной ориентацией образца в трех перпендикулярных направлениях. В настоящей работе для каждого образца всегда приводится среднее значение  $\chi_0$ . В процессе измерений насыщения прибора ни разу не достигалось. Использованные частота и амплитуда переменного поля составляли 1025 Гц и 300 А/м, соответственно. Как указывалось выше, преимуществом этого типа магнитных измерений – измерений  $\chi_0$  – является отсутствие необходимости нагрева (измерения проводятся при комнатной температуре). Помимо прочего, они не влекут за собой механических разрушений, нарушения магнитной структуры или стирание (переписывание) первоначального палеомагнитного сигнала – естественной остаточной намагниченности NRM.

Таблица. Магнитные свойства образцов хондрита Челябинск

Название образца	<i>m</i>	$\chi_0$	$\chi_{hf}$	NRM	SIRM	MDF <sub>i</sub>	$M_s$	$M_{rs}/M_s$	$B_c$	$B_{cr}$	$B_{cr}/B_c$
<b>СК* (без коры плавления)</b>											
1-1	176	29.7	506	4.5	1312	7	6.3	0.002	0.5	24	48.0
1-2	177	41.6	—	11.6	2072	10	—	—	—	—	—
1-3	154	28.3	—	12.6	1511	6	—	—	—	—	—
1-4	101	27.8	—	7.0	1256	8	—	—	—	—	—
1-5	250	21.5	311	4.8	1113	8	4.8	0.003	0.6	19	31.7
1-6	298	29.7	189	9.2	1386	7	6.8	0.002	0.6	20	33.3
1-7	130	25.4	416	10.3	1213	7	5.2	0.003	0.6	32	53.3
1-8	222	41.5	—	27.8	3354	8	—	—	—	—	—
1-9	99	32.7	311	6.9	1880	7	7.4	0.003	0.6	19	31.7
<i>среднее</i>	<i>179</i>	<i>30.9</i>	<i>347</i>	<i>10.5</i>	<i>1677</i>	<i>8</i>	<i>6.1</i>	<i>0.003</i>	<i>0.6</i>	<i>23</i>	<i>39.6</i>
<b>СК* (с корой плавления)</b>											
1-01	114	23.1	—	26.9	3970	—	—	—	—	—	—
1-02	156	31.1	482	38.5	4159	14	6.0	0.008	1.6	25	15.6
1-03	55	38.1	229	141.3	11561	14	8.7	0.009	2.4	28	11.7
<i>среднее</i>	<i>108</i>	<i>30.8</i>	<i>356</i>	<i>68.9</i>	<i>6563</i>	<i>14</i>	<i>7.4</i>	<i>0.009</i>	<i>2.0</i>	<i>27</i>	<i>13.7</i>
<b>УР** (без коры плавления)</b>											
d-1	337	34.2	—	9.0	5339	5	—	—	—	—	—
d-2	405	31.8	459	7.9	5108	6	6.5	0.007	1.7	19	11.2
d-3	391	34.0	249	52.2	5514	5	7.1	0.008	1.7	12	7.1
d-4	390	33.1	—	10.1	5078	5	—	—	—	—	—
d-5	242	31.6	—	56.3	4382	6	—	—	—	—	—
<i>среднее</i>	<i>353</i>	<i>32.9</i>	<i>354</i>	<i>27.1</i>	<i>5084</i>	<i>5</i>	<i>6.8</i>	<i>0.008</i>	<i>1.7</i>	<i>16</i>	<i>9.2</i>
<b>УР** (с корой плавления)</b>											
d-01	181	25.9	—	11.5	4792	10	—	—	—	—	—
d-02	119	41.5	1193	46.1	6133	6	7.2	0.009	1.7	16	9.4
d-03	102	33.9	254	17.7	5686	7	7.5	0.008	1.8	17	9.4
d-04	96	29.3	194	53.0	6425	6	6.5	0.008	2.1	18	8.6
<i>среднее</i>	<i>125</i>	<i>32.7</i>	<i>547</i>	<i>32.1</i>	<i>5759</i>	<i>7</i>	<i>7.1</i>	<i>0.008</i>	<i>1.9</i>	<i>17</i>	<i>9.1</i>

\* СК — светлая (основная) компонента метеоритного вещества, \*\* УР — ударно-расплавленная брекчия.

*m* — масса (в мг),  $\chi_0$  — магнитная восприимчивость (в  $10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг),  $\chi_{hf}$  — магнитная восприимчивость в сильных магнитных полях, характеризующая парамагнитный (а также диа- и антиферромагнитный) вклад (в  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг), NRM — естественная остаточная намагниченность (в  $10^{-5}$  Ам<sup>2</sup>/кг), SIRM — остаточная намагниченность насыщения (в  $10^{-5}$  Ам<sup>2</sup>/кг), MDF<sub>i</sub> — медианное поле разрушения SIRM (от англ. "median destructive field"), при котором размагничивается 50% от начального значения SIRM (в мТл),  $M_s$  — намагниченность насыщения (в Ам<sup>2</sup>/кг),  $M_{rs}$  — остаточная намагниченность насыщения,  $B_c$  — коэрцитивная сила (в мТл),  $B_{cr}$  — остаточная коэрцитивная сила (в мТл).



**Рис. 1.** Диаграмма распределения значений логарифма магнитной восприимчивости  $\chi_0$  для разных петрологических типов обыкновенных хондритов (данные работы [1]). СК – светлая компонента метеорита Челябинск, УР – ударно-расплавная брекчия метеорита Челябинск.

Остальные магнитные измерения были проведены в Институте магнетизма горных пород (Institute for Rock Magnetism, г. Миннеаполис, США). Значения магнитной восприимчивости при 20°C измерялись на каппометре KLY2-CS2 компании Agico. NRM и кривые размагничивания NRM переменным магнитным полем до 170 мТл (далее AF от англ. “Alternating Field”), а также кривые SIRM(AF) были измерены на SQUID-магнитометре компании 2G Enterprises со встроенной размагничивающей установкой, который позволяет измерять магнитный момент вплоть до  $10^{-4}$  Ам<sup>2</sup> с уровнем шума порядка  $10^{-11}$  Ам<sup>2</sup> (и размагничивать образцы переменным магнитным полем с максимальной амплитудой до 170 мТл). Лабораторно-индуцированная SIRM создавалась при комнатной температуре в поле 1 Тл при использовании импульсного намагничивающего устройства 2G670 компании 2G Enterprises. Петли гистерезиса (с такими характерными параметрами как  $B_c$ ,  $M_s$ ,  $M_{rs}$ ), и значения остаточной коэрцитивной силы  $B_{cr}$  в температурном диапазоне от 10 К до 700°C, а также температурные зависимости  $M_s(t)$  (далее – термомагнитные (ТМ) кривые) в температурном диапазоне от 20°C до 700°C были измерены на вибрационном магнитометре MicroMag VSM компании Princeton с высокотемпературной печью и криостатом (нагрев производился в атмосфере гелия). Чувствительность прибора и максимальное магнитное поле составляют 0.5 нАм<sup>2</sup> и 1.5 Тл, соответственно,  $t_c$  материала определялись из ТМ кривых  $M_s(t)$ . Зависимость магнитной восприимчивости от частоты переменного магнитного поля была измерена при использовании прибора MPMS (Magnetic Propert-

ties Measurement System) компании Quantum Design, позволяющего проводить измерения в диапазоне температур от 5 К до 300 К и магнитных полей – от 0 до 5 Тл.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Магнитная восприимчивость коллекции фрагментов Челябинска*

Результаты магнитных измерений представлены на рис. 1. Среднее значение  $\lg\chi_0$  (здесь и далее,  $\lg\chi_0$  представлен в единицах  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг) составляет  $4.54 \pm 0.10$  (минимальное значение: 4.24; максимальное значение: 4.71) для светлой компоненты и  $4.65 \pm 0.09$  (минимальное значение: 4.44; максимальное значение: 4.86) для ударно-расплавной брекчии. Как следует из рис. 1, значения  $\lg\chi_0$  для светлой компоненты (основное вещество) попадают в область LL5, а значения для темной компоненты (ударный расплав) располагаются на диаграмме несколько выше (между LL5 и L5, ближе к LL5), что может указывать на большее содержание металлического железа в ударном расплаве (см. ниже). В целом, по магнитной классификации метеорит Челябинск попадает в область LL5, при этом он является в три раза более магнитным, чем типичные метеориты класса LL5 (в этом отношении Челябинск наиболее похож на хондриты LL5: Aldsworth, Richmond, Paragould [1]). В одном фрагменте темной компоненты (образец 10–90; 3.7 г) измерено очень высокое значение  $\lg\chi_0 = 5.24$ , которое типично для H хондритов. Возможно, этот фрагмент обогащен металлическим железом и требует минералогического изучения. Других аномалий в коллекции не обнаружено.

Зависимость  $\chi_0$  от частоты переменного магнитного поля (использовались три рабочие частоты: 1, 10 и 100 Гц) была исследована в температурном диапазоне от 10 до 300 К для одного образца светлой компоненты и одного образца ударного расплава. Дисперсия  $\chi_0$  в основном не превышает 0.25%, что свидетельствует об отсутствии (или пренебрежимо малом количестве) суперпарамагнитных зерен металла (с характерным размером при комнатной температуре менее 20 нм [3]).

Данные по магнитной восприимчивости позволяют оценить среднее содержание металла. Так, согласно рис. 1 из работы [3] (на котором представлена диаграмма зависимости  $\chi_0$  от мас. % металлического железа), получаем следующую оценку для светлой компоненты: 6.4 мас. %. Такая оценка явно завышена. Действительно, в работе [3] отмечается, что оценка доли металла в образце по величине  $\chi_0$  дает верхний предел содержания металлического железа в образце и даже может быть несколько завышенной в связи с целым рядом причин: неизометричная форма металлических зерен, их взаимодействие, неидеальное распределе-

ние металлических зерен в образце, а также наличие суперпарамагнитных зерен в образце, хотя последняя причина в нашем случае исключается.

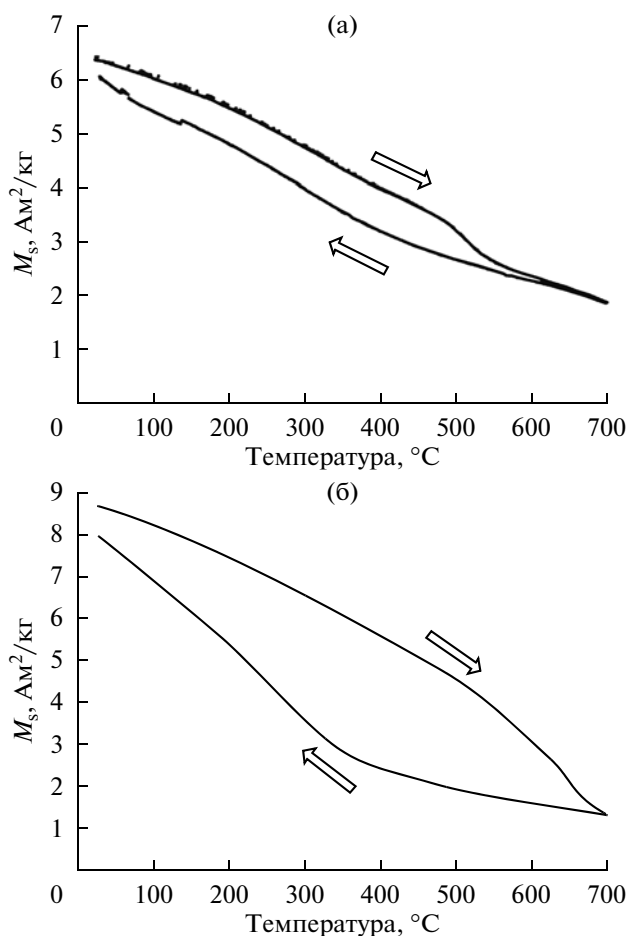
**Термомагнитный анализ и оценка доли металла в веществе по  $M_s$**

Для характеристики доминирующей магнитной минералогии был проведен термомагнитный анализ образцов темной и светлой компонент в температурном диапазоне от 20°C до 700°C и измерены кривые  $M_s(t)$  (рис. 2а, б). Интересно отметить, что при 700°C сохраняется 29% от  $M_s$  (20°C) (рис. 2а) для светлой компоненты и 15% от  $M_s$  (20°C) (рис. 2б) для темной компоненты. Парамагнитный вклад  $M_s^*$  в  $M_s$  ударно-расплавной брекчии, оцененный на основании значений магнитной восприимчивости в сильных магнитных полях  $\chi_{hf}$  при 20°C (табл. 1) и 700°C как произведение  $\chi_{hf}(700°C)$  и напряженности намагничивающего поля (1.5 Тл), составляет не более 2–3% (из 15%); вклад  $M_s^*$  в  $M_s$  светлой фазы составляет не более 4–7% (из 29%). Учитывая вышесказанное и информацию о химическом составе Fe–Ni металла в хондрите Челябинск, такие высокие значения  $M_s$  при 700°C, вероятно, связаны с  $t_c$  камасита: 740–770°C [9], выходящей за пределы исследованного температурного диапазона.

Из рис. 2 (а–б) видно, что материал ударно-расплавной брекчии более устойчив к терморазмагничиванию, чем материал светлой компоненты. Возможно, металлическая компонента темного материала была обогащена камаситом и, возможно, мартенситом в результате процессов ударного метаморфизма, что сделало все вещество темной компоненты более устойчивым к воздействию температур. После циклов нагрев–охлаждение вещество практически возвращается в исходное состояние (см. значения  $M_s$  при комнатной температуре на кривой охлаждения), что указывает на отсутствие существенных изменений в магнитной минералогии образцов с связи с нагревом до 700°C.

Проанализируем более подробно кривые  $M_s(t)$ . Визуализация первых производных  $dM_s/dt$  дает следующие пики на кривых нагрева  $M_s(t)$ : 512°C (светлая компонента) и 541°C и 650°C (темная компонента). Эти пики указывают на  $t_c$  доминирующих фаз и, вероятно, связаны с тэнитом (точки 512°C и 541°C), что также подтверждается и характерной для тэнита формой кривых  $M_s(t)$ . При этом  $t_c = 650°C$  может указывать на камасит [9]. На кривых охлаждения наблюдаются пики, связанные с мартенситовым переходом в процессе охлаждения.

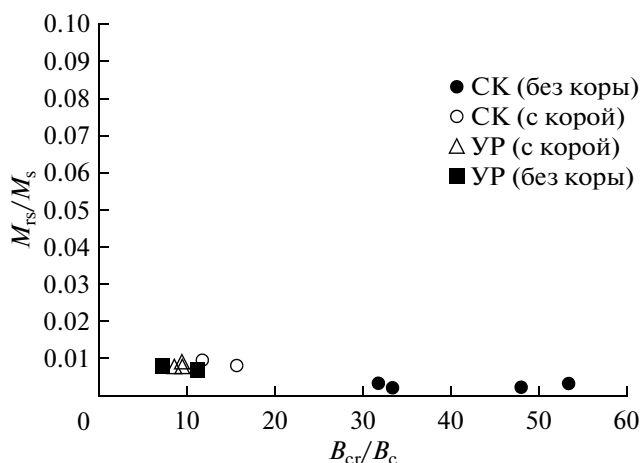
Таким образом, магнетизм хондрита Челябинск при комнатной температуре в основном определяется камаситом и тэнитом. На отсутствие тетратэнита указывают несколько факторов, вклю-



**Рис. 2.** Кривые температурной зависимости намагниченности насыщения  $M_s$  (термомагнитные кривые) для (а) светлой компоненты метеорита Челябинск, (б) для темной компоненты метеорита Челябинск. На каждом графике представлены циклы нагрев–охлаждение, при этом соответствующее направление изменения температуры указано стрелкой.

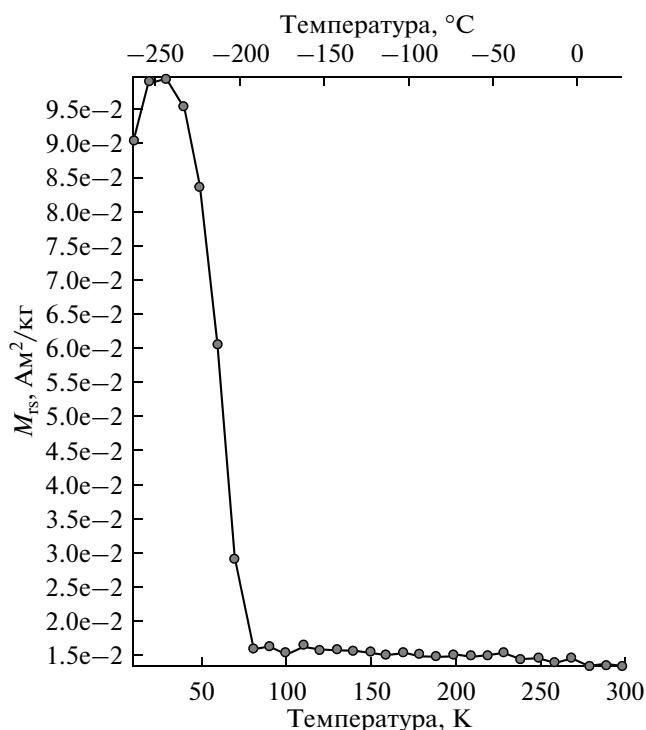
чая форму термомагнитных кривых (отсутствие характерного перехода тетратэнит–тэнит при температуре 550°C) и относительно низкие значения магнитной жесткости – остаточной коэрцитивной силы  $B_{cr}$  (таблица).

Выше приведены оценки среднего процентного содержания металлического железа для светлой и темной компонент, полученные из анализа значений  $\chi_0$ . Такие оценки также можно провести методом сравнения измеренной намагниченности насыщения  $M_s$  образцов (таблица) и справочных величин  $M_s$  для камасита (220 Ам²/кг [9]) и тэнита (150 Ам²/кг [9]). Выше указывалось, что доли камасита и тэнита в металле хондрита Челябинск составляют 20 мас. % и 80 мас. %, соответственно. Значит,  $M_s$  металлической фазы Челябинска составляет 164 Ам²/кг. Таким образом, средняя доля металлического железа в светлой составляющей получается равной 3.7 мас. %, а в



**Рис. 3.** График зависимости  $M_{rs}/M_s$  от  $B_{cr}/B_c$  (график Дзэ), характеризующий доменное состояние магнитных включений.  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $M_{rs}$  — остаточная намагниченность насыщения,  $B_c$  — коэрцитивная сила,  $B_{cr}$  — остаточная коэрцитивная сила. СК — светлая компонента, УР — ударно-расплавная брекчия хондрита Челябинск. Металлические зерна являются многодоменными.

ударно-расплавной брекчии — 4.1 мас. % (для расчетов использованы средние значения  $M_s$  светлой и темной составляющих для образцов без коры плавления, таблица).



**Рис. 4.** Зависимость остаточной намагниченности насыщения от температуры в температурном диапазоне от 10 К до 20°С. Пик при температуре 75 К характеризует хромит, входящий в состав хондрита Челябинск.

### Магнитный гистерезис и остаточная намагниченность

График зависимости  $M_{rs}/M_s$  от  $B_{cr}/B_c$  (так называемый график Дзэ [10]), позволяющий получить информацию о доменном состоянии и, следовательно, размере зерен металла, представлен на рис. 3. Как известно, критерий однодоменности металлического железа (минимальный размер, при котором металлические зерна являются однодоменными) составляет  $<0.1$  мкм (0.023 мкм согласно экспериментальному определению [8]). Из таблицы и рис. 3 видно, что металлические включения (зерна) метеорита Челябинск являются многодоменными (для образцов светлой фазы без коры плавления среднее  $M_{rs}/M_s = 0.003$ , а  $B_{cr}/B_c = 39.6$ ), но при этом металлические зерна светлой компоненты крупнее металлических зерен темной компоненты (для образцов темной компоненты без коры плавления средние значения  $M_{rs}/M_s = 0.008$ , а  $B_{cr}/B_c = 9.2$ ). Изученные образцы (при 20°С) характеризуются низкими значениями  $B_c$  ( $B_c = 0.6$  мТл для образцов светлой компоненты и 1.7 мТл для образцов темной компоненты, таблица) и  $B_{cr}$  (23 мТл для светлой компоненты и 16 мТл для темной компоненты, таблица). Для сравнения в таблице приведены параметры петель гистерезиса и значения  $B_{cr}$  для образцов с корой плавления. Видно, что эти параметры отличаются в связи с наличием в коре плавления минералов, образовавшихся в результате окисления в атмосфере (например, магнетита).

В таблице приведены также значения NRM и SIRM для всех исследованных образцов. Интересно отметить, что эти значения систематически выше для образцов темной компоненты по сравнению со светлой компонентой, а также для образцов с корой плавления по сравнению с образцами без коры плавления. Очевидно, что остаточная намагниченность в образцах с корой плавления инициируется магнитным полем Земли. Природа и возможные механизмы образования NRM будут исследованы в последующих работах.

Анализ спектров размагничивания SIRM переменным магнитным полем с амплитудой до 170 мТл показал, что средние значения  $MDF_i$  (от англ. “Median Destructive Field”), характеризующие устойчивость SIRM образцов к размагничиванию переменным полем, достаточно низкие и составляют 5–8 мТл, что согласуется со значениями  $B_c$  и  $B_{cr}$ .

На рис. 4 представлены значения остаточной намагниченности от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 10 К. Яркое выраженный пик при  $\sim 75$  К и резкое возрастание остаточной намагниченности ниже этой температуры является результатом магнитного упорядочивания хромита, который претерпевает фазовый переход II рода и становится ферримагнитным ниже этой температуры, что согласуется с ранее опублико-

ванными данными для обыкновенных хондритов [11]. В самом деле, в составе метеорита Челябинск был обнаружен хромит (0.5 мас. %) с примесями Mg и Al:  $Fe/(Fe + Mg) = 0.90$ ,  $Cr/(Cr + Al) = 0.86$  (атомные отношения). В работе [11] указано, что температура магнитного упорядочивания обыкновенных хондритов LL5 (Olivenza и Tuxtuac) составляет 71–76 К, что согласуется с нашими данными для метеорита Челябинск.  $V_{cr}$  для светлой компоненты метеоритного вещества при температуре 10 К составляет 606 мТл (а при комнатной температуре: 32 мТл); для ударно-расплавной брекчии  $V_{cr} = 157$  мТл при 10 К и 19 мТл при комнатной температуре. Более подробное исследование низкотемпературных свойств метеорита Челябинск будет представлено в последующих публикациях.

### ВЫВОДЫ

1. Определена магнитная восприимчивость 104 фрагментов метеорита Челябинск с массой более 3 г из коллекции ГЕОХИ РАН. Средние значения логарифма магнитной восприимчивости  $\lg \chi_0$  для светлой и темной составляющих этого метеорита  $-4.54 \pm 0.10$  и  $4.65 \pm 0.09$  ( $\times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг), соответственно. Таким образом, согласно общепринятой международной магнитной классификации [1], метеорит Челябинск соответствует хондритам LL5; при этом он является в три раза более магнитным, чем типичные метеориты класса LL5.

2. Металлические включения в метеорите являются многодоменными с низкими значениями коэрцитивной силы  $V_c$  (< 1 мТл для светлой компоненты и 1.7 мТл для ударно-расплавной брекчии) и остаточной коэрцитивной силы  $V_{cr}$  (23 мТл для светлой компоненты и 15 мТл для ударно-расплавной брекчии).

3. При этом зерна металла светлой компоненты крупнее зерен металла темной компоненты, а значения NRM и SIRM для образцов ударно-расплавной брекчии систематически выше соответствующих значений для образцов светлой компоненты.

4. Проведенные оценки среднего содержания металла в светлой и темной компонентах Челябинского метеорита по данным  $M_s$  показали, что в светлой компоненте в среднем содержится 3.7 мас. % металла, а в ударном расплаве — 4.1 мас. %.

5. Термомагнитный анализ образцов в соответствии с минералогическими данными, показывает, что основными носителями магнитных свойств метеорита Челябинск в температурном диапазоне >75 К являются тэнит и камасит.

6. При температуре ~75 К хромит хондрита Челябинск переходит из парамагнитного в ферримагнитное состояние (фазовый переход II рода) и, ниже 75 К, становится доминирующим магнитным минералом — носителем остаточной намагниченности, что хорошо согласуется с ранее

опубликованными данными для обыкновенных хондритов [11]. Магнитная жесткость  $V_{cr}$  образцов максимальна при температуре 10 К и составляет 606 мТл для основной фазы и 157 мТл для ударно-расплавной брекчии.

*Н.С. Безаева благодарна Институту Магнетизма горных пород (Institute for Rock Magnetism) г. Миннеаполис (США) за предоставление возможности работы на оборудовании Института и помощь в проведении экспериментов.*

*Работа была выполнена при поддержке Программы 22 Президиума РАН.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G., Folco L., Gattacceca J., Osete M.L., Pesonen L. Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites // *Meteoritics & Planetary Science*. 2003. V. 38. № 2. P. 251–268.
2. 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 // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. V. 43. № 5. P. 959–980.
3. Rochette P., Gattacceca J., Bourot-Denise M., Consolmagno G., Folco L., Kohout T., Pesonen L., Sagnotti L. Magnetic classification of stony meteorites: 3. Achondrites // *Meteoritics & Planetary Science*. 2009. V. 44. № 3. P. 405–427.
4. Kohout T., Jenniskens P., Shaddad M.H., Haloda J. Inhomogeneity of asteroid 2008 TC<sub>3</sub> (Almahata Sitta meteorites) revealed through magnetic susceptibility measurements // *Meteoritics & Planetary Science*. 2010. V. 45. № 10–11. P. 1778–1788.
5. Rochette P., Gattacceca J., Bezaeva N.S., Obolonskaya E.V., Polyarnaya J.A., Skripnik A.Ya., Nazarov M.A. Scanning meteorite collections for misclassified/misidentified samples: examples from Saint Petersburg and Moscow // 72nd Annual Meteoritical Society Meeting. 2009, abstract #5029.
6. Stöffler D., Keil K., Scott E.R. Shock metamorphism of ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. № 12. P. 3845–3867.
7. Consolmagno G.J., Macke R.J., Rochette P., Britt D.T., Gattacceca J. Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers // *Meteoritics & Planetary Science*. 2006. V. 41. № 3. P. 331–342.
8. Kneller E.F., Luborsky F.E. Particle size dependence of coercivity and remanence of single-domain particles // *Journal of Applied Physics*. 1963. V. 34. P. 656–658.
9. Sugiura N., Strangway D.W. Magnetic studies of meteorites / In: *Meteoritics and the early solar system* (eds. Kerridge J.F., Mathews M.S.). 1988. Arizona: University of Arizona Press, P. 595–615.
10. Dunlop D., Ozdemir O. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*. 1997. Cambridge: Cambridge University Press, 573 p.
11. Gattacceca J., Rochette P., Lagroix F., Mathé P.-E., Zanda B. Low temperature magnetic transition of chromite in ordinary chondrites // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L10203.