6. *Палеомагнетизм палеозоя* // Под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра,1974. 238 с.
7. *Палеомагнитология* // Под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.
8. *Молостовский Э.А*. Палеомагнитная стратиграфия верхней перми и триаса востока Европейской части СССР. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1983. 167 с.
9. *Методика палеомагнитного изучения красноцветов* // Под ред. В.П. Боронина. Казань: Изд-во Казанского университета, 1979. С.114-129.
10. *Боронин В.П.* О взаимосвязи магнитных свойств и геологических особенностей отложений перми и триаса на востоке Русской платформы // Латеральная изменчивость состава и физических свойств осадочной толщи в пределах локальных структур и ее отражение в зональности геофизических полей. Пермь, 1974.
11. *Лозовский В.Р., Ерофеев-Щак В.А., Афонин С.А.* О пепловых горизонтах и продуктах постэруптивных изменений пеплов в нижнем триасе Московской синеклизы// Известия ВУЗов. Геология и разведка, №3. 2001. С.19-28.
12. *Муравьев Ф.А., Балабанов Ю.П.* Литолого-минералогическая и палеомагнитная характеристика пограничных отложений перми и триаса центральной части Московской синеклизы // Верхний палеозой России. Стратиграфия и фациальный анализ. Казань: Изд-во Казанского университета, 2009. С.198-199.
13. *Сенников А.Г., Голубев В.К.* К фаунистическому обоснованию границы перми и триаса в континентальных отложениях Восточной Европы. 1. Гороховец – Жуков овраг. // Палеонтологический журнал. №3. С. 88-98.
14. *Lozovsky V., Krasilov V., Afonin S., Burov B., Yaroshenko O*. Transitional Permian-Triassic deposits in European Russia and non-marine correlations // Natura Bresciana.Ann.Mus.Giv.sc.Nat., brescia, Monografia. No.25. 2001. 3010310.
15. *Claoue-Long J.C., Zhang Z.C., Ma G.G., Du S.H.* The age of the Permian-Triassic boundary// Earth and Planet. Sci. Lett.1991.V.105. P.182-190.

Магнитные свойства метеорита Челябинск

Н.С. Безаева[1], *Д.Д. Бадюков*[2], *М.А. Назаров*[2], *P. Rochette*[3], *J.M. Feinberg*[4,5], *В.И. Трухин*[1]

[1] *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*
[2] *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва*
[3] *CEREGE, CNRS, Aix-MarseilleUniversité, Экс-ан-Прованс, Франция*
[4] *Institute for Rock Magnetism, University of Minnesota, Миннеаполис, США*
[5] *Department of Earth Sciences, University of Minnesota, Миннеаполис, США*

Магнитные свойства метеоритов эффективно используются для их классификации [1-3] и имеют принципиальное значение для понимания природы магнитных полей на ранних этапах эволюции Солнечной системы. На сегодняшний день собрана и опубликована расширенная систематическая база данных по магнитной восприимчивости χ_0 каменных метеоритов, в которую вошли тысячи образцов разных типов, хранящихся в основных метеоритных коллекциях мира (обыкновенные хондриты [1], другие хондриты [2], ахондриты [3]). Созданная база уже многократно успешно использовалась как инструмент для быстрой классификации метеоритов, а также оперативного обнаружения ошибок в их классификации. Магнитная классификация метеоритов по χ_0 удобна и информативна в связи с тем, что, во-первых, измерения χ_0

являются быстрыми и неразрушающими; во-вторых, измерители магнитной восприимчивости являются широко распространёнными, 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 также позволяет получить независимые оценки содержания ферримагнитных минералов в веществе и выяснить их детальные магнитные свойства.

15 февраля 2013 г. над Челябинской областью наблюдался крупный болид, который сопровождался выпадением метеоритного дождя. Вещество найденных метеоритов, которым присвоено название Челябинск, относится к обыкновенным хондритам группы LL петрологического типа 5 со стадией ударной метаморфизма S4 и степенью выветривания W0. Челябинское событие представляет собой самое масштабное катастрофическое явление со времен Тунгусского события 1908 г. Метеорит Челябинск – это 134ый метеорит России и 51ое падение. Анализ Челябинского метеоритного дождя с точки зрения распределения по массам и размерам, а также оценка возможной массы максимального фрагмента представлены в работе [4].

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 фрагментов 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 – ударно-расплавная брекчия. По химическому составу светлая и темная компоненты почти не отличаются. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск представлены в работе [5].

Мы изучили распределения магнитной восприимчивости χ_0 фрагментов хондрита Челябинск из коллекции ГЕОХИ РАН, а также провели полную магнитную характеристику метеоритного вещества (в температурном диапазоне от 10 до 1073К), которая включает в себя термомагнитный анализ (выявляющий характерные точки Кюри или точки фазовых переходов, например, $\alpha\rightarrow\gamma$ доминирующих магнитных фаз), исследование естественной остаточной намагниченности NRM (от англ. “natural remanent magnetization”) и получение спектров терморазмагничивания и размагничивания в переменных магнитных полях с амплитудой до 170 мТл NRM и остаточной намагниченности насыщения SIRM (от англ. “saturation isothermal remanent magnetization”), и таких характеристик как 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) и др. Результаты магнитных исследований изложены в работах [6-7].

Для светлой и темной компонент метеоритного вещества средние значения $\lg\chi_0$ по коллекции составляют 4.57±0.09 (n=135) и 4.65±0.09 (n=39) (здесь

и далее $\lg\chi_0$ представлен в единицах $\times 10^{-9}$ м^3/кг), соответственно. Таким образом, темная компонента несколько богаче металлом. На рис. 1 представлена диаграмма распределения значений $\lg\chi_0$ для обыкновенных хондритов H, L, LLи L/LL разных петрологических типов, а также соответствующие значения для темной и светлой компонент хондрита Челябинск (данные из обновленной базы данных P. Rochette, по отношению к работе [1]). Метеорит Челябинск в три раза более магнитный, чем типичные метеориты класса LL5, но сходен с подгруппами других богатых металлом метеоритов классов LL5 (например, *Paragould*, *Aldsworth*, *Bawku*, *Richmond*) и L/LL5 (*Glanerbrug*, *Knyahinya*, *Qidong*). В частности, среднее значение $\lg\chi_0$ метеорита *Paragould* (4.56±0.07) совпадает с соответствующим значением для светлой компоненты метеорита Челябинск. Изучение 174 образцов метеорита Челябинск из коллекции ГЕОХИ РАН выявило два необычных образца с аномально высокими значениями $\lg\chi_0$ (5.24 и 5.47), соответствующими хондритам H типа (Рис.1). Оба образца состоят из темной компоненты. Природа этих аномалий будет изучена и представлена в последующих работах. Других аномалий в коллекции ГЕОХИ РАН не обнаружено.

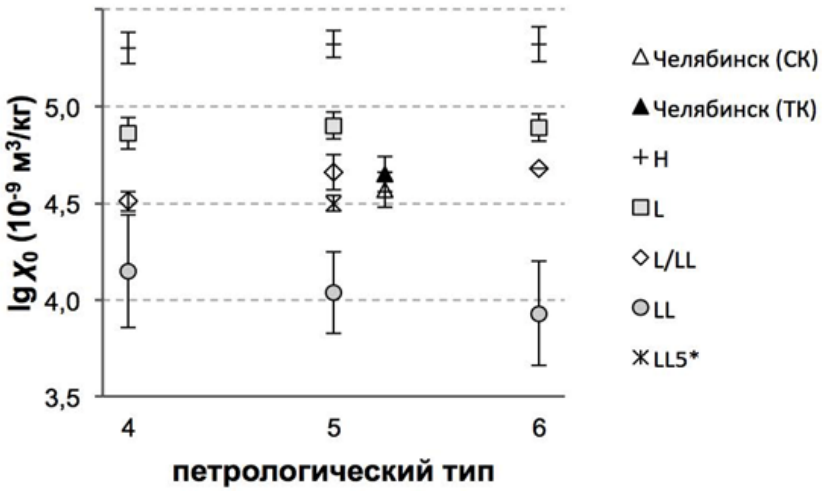

Рис. 1. Диаграмма распределения значений десятичного логарифма магнитной восприимчивости χ_0 для обыкновенных хондритов H, L, LL и L/LL разных петрологических типов. На диаграмме также представлена подгруппа богатых металлом LL5 хондритов (**Paragould, Aldsworth, Bawku, Richmond*) и данные для светлой и темной компонент хондрита Челябинск (СК и ТК, соответственно).

Оценки среднего содержания металла по намагниченности насыщения M_s в светлой и темной компонентах составляют 3.7 мас.% и 4.1 мас.%, соответственно. Эти значения соответствуют хондритам класса LL, среднее содержание металла в которых составляет 2.94±1.51 вес.% (n=14) [8]. Оценки содержания металла по магнитной восприимчивости дают завышенные значе-

ния в связи с целым рядом факторов, одним из которых является большое количество суперпарамагнитных зерен металла (с характерным размером менее 20 нм).

При комнатной температуре металлические зерна являются многодоменными и характеризуются низкими значениями коэрцитивной силы B_c (<2 мТл) и остаточной коэрцитивной силы B_{cr} (15-23 мТл), что указывает на отсутствие тетратэнита, характерного для хондритов LL. Это может быть связано с ударным метаморфизмом метеорита Челябинск (S4) и связанного с ударом нагрева, в результате которого тетратэнит был трансформирован в богатый никелем тэнит. Зависимость магнитной минералогии и, в частности, магнитной жесткости образцов обыкновенных хондритов от степени их ударного метаморфизма (*shockstage*) впервые наглядно продемонстрирована в работе [8].

Термомагнитный анализ образцов метеорита Челябинск показал, что основными носителями магнитных свойств метеорита Челябинск в температурном диапазоне >80 К являются тэнит и камасит. В температурном диапазоне ниже 75К магнитные свойства определяются хромитом; магнитная жесткость образцов максимальна при 10К и составляет 606 мТл для светлой компоненты и 157 мТл для темной компоненты. Низкотемпературные свойства метеорита Челябинск и химических состав входящего в его состав хромита согласуются с ранее опубликованными данными для обыкновенных хондритов [9].

Работа выполнена при поддержке Программы 22 Президиума РАН и U.S. National Science Foundation IRM Visiting Fellowship.

1. *Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G. et al.* Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites // Meteorit. Planet. Sci. 2003. V. 38 (2), P. 251-268.
2. *Rochette P., Gattacceca J., Bonal L., Bourot-Denise M. et al.* Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites // Meteorit.& Planet. Sci. 2008. V. 43(5), P. 959-980.
3. *Rochette P., Gattacceca J., Bourot-Denise M., Consolmagno G. et al.* Magnetic classification of stony meteorites: 3. Achondrites. Meteorit. Planet. Sci.2009. V. 44(3), C. 405-427.
4. *Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е.* Фрагменты Челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента // Геохимия. 2013. №7. С. 643-646.
5. *Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А. и др.* Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // Геохимия. 2013. №7. С. 580-598.
6. *Безаева Н.С., Бадюков Д.Д., Назаров М.А., Рошетт П., Фейнберг Дж.* Магнитные свойства метеорита Челябинск: предварительные результаты // Геохимия. 2013. №7. С. 629-635.
7. *Bezaeva N.S., Badyukov D.D., Nazarov M.A., Rochette P., Feinberg F.M., Markov G.P., Borschneck D., Demory F., Gattacceca J.* Magnetic properties of the LL5 ordinary chondrite Chelyabinsk (fall of February 15, 2013) // Meteorit. Planet. Sci.(*submitted*).
8. *Gattacceca J., Suavet C., Rochette P., Weiss B. et al.*Metal phases in ordinary chondrites: magnetic hysteresis properties and implications for thermal history // Meteorit. Planet. Sci.(*submitted*).