

УДК 523.681.2+552.63

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*А.И. Бахтин, О.П. Шиловский, Ю.Н. Осин*

Изучен обломок метеорита, взорвавшегося в атмосфере над городом Челябинском 15 февраля 2013 г. В изученном образце обнаружены хондры, связывающая их минеральная масса и корка поверхностного оплавления. Определен их минералогический и химический состав и сделан вывод о том, что метеорит относится к химической группе LL класса обыкновенных хондритов.

Ключевые слова: метеориты, метеорит Челябинск, хондриты.

Введение

В работе приводятся результаты исследования вещества метеорита Челябинск, который взорвался в атмосфере в районе города Челябинска 15 февраля 2013 г. Взрыв привел к распаду метеорита на множество небольших обломков. Один из таких обломков массой около 0.5 г был любезно передан для исследования Музеем естественной истории Татарстана (г. Казань). Из него был изготовлен петрографический шлиф без покровного стекла, который был изучен под микроскопом в поляризованном свете. Непокрытая поверхность шлифа была отполирована и с нее были проведены точечные и площадные микрозондовые анализы на сканирующем автоэмиссионном электронном микроскопе «Мерлин», совмещенном с детектором EDX «Aztec», в режиме ASD-детектор, с ускоряющим напряжением 20 кВ. В общей сложности было выполнено 30 микрозондовых анализов, результаты которых пересчитывались на минералогический состав зондируемого вещества.

Метеоритное вещество имеет большое значение для познания Солнечной системы, так как считается, что метеориты представляют собой наиболее примитивное (исходное) вещество Солнечной системы и с момента образования они не испытали или почти не испытали химического фракционирования или изменения [1]. Метеориты представляют большую научную ценность, поскольку они позволяют восстанавливать раннюю историю Солнечной системы и способствуют пониманию происхождения Земли и планет.

Начало систематического петрографического исследования метеоритов в нашей стране связывают с именем А.Н. Заварицкого, который в 1952 г. опубликовал фундаментальную монографию «Метеориты СССР», написанную совместно с Л.Г. Квашой [2].

Главными минералами метеоритов являются оливины, пироксены, плагиоклазы, самородные металлы (сплавы железа и никеля, представленные камситом, тенитом и др.), троилит, графит [3]. В малых количествах в метеоритах присутствуют второстепенные и акцессорные минералы, причем многие из них

неизвестны в породах земной коры, что обусловлено сильно восстановительным режимом формирования первичных минералов метеоритов.

Метеориты классифицируются по минералогическому составу. Наиболее популярной является классификация, предложенная Б. Мейсоном [4]. Выделяют три группы метеоритов: каменные, железокаменные и железные. *Каменные* делятся на две подгруппы: хондриты и ахондриты, причем содержание металлического железа в первых составляет около 10%, а во вторых – около 1% и менее. Характерной особенностью хондритов является наличие в них хондр – сфероидальных силикатных образований (до нескольких миллиметров в диаметре), заключенных в тонкозернистую матрицу того же состава с примесью металлической сульфидной фаз. Ахондриты не содержат хондр. *Железокаменные* метеориты содержат примерно поровну металлической фазы и силикатов того же состава, что и в каменных метеоритах. *Железные* метеориты состоят преимущественно из самородного железа (в сплаве с никелем), содержание которого превышает 90%. Дальнейшая классификация метеоритов строится по минералогическому составу слагающих их силикатов, а для хондритов используется еще и общее содержание железа, и количественное соотношение самородного железа и общего железа. По этим признакам выделяют следующие группы хондритов:

- Н – с высоким содержанием (High) общего и металлического железа;
- L – с низким содержанием (Low) общего и металлического железа;
- LL – с очень низким (Low, Low) содержанием железа;
- E – энстатитовые хондриты с высоким содержанием общего и металлического железа;
- C – углистые хондриты с высоким содержанием общего и низким содержанием металлического железа.

Наиболее часто встречаются оливин-гиперстеновые хондриты групп Н, L, LL, которые обычно состоят из оливина (35–60%), гиперстена (25–40%), плагиоклаза, никелистого железа и троилита.

Метеориты являются обломками распавшихся планет и астероидов, большая часть которых движется в обширном поясе между орбитами Марса и Юпитера. Возраст метеоритов составляет 4.5–4.6 млрд лет и совпадает с возрастом Земли 4.56 млрд лет. Таким образом, метеориты представляют собой древнейшие космические породы Солнечной системы, образованные из вещества протосолнечной туманности, причем большинство исследователей рассматривают хондриты как прямые конденсаты вещества протосолнечной туманности в процессе ее охлаждения, а железные и железокаменные метеориты как продукты аккреционной дифференциации хондритов в недрах планет, в результате которой у планет образуются ядро, мантия и кора.

Результаты и их обсуждение

В петрографическом шлифе изученного нами образца метеорита Челябинск оказались две хондры, связывающая их минеральная масса и корка поверхностного оплавления. Хондры имели следующие размеры: 3×5 мм и 3×4 мм. Хондры сложены мелко-среднезернистым агрегатом зерен оливина, единичные зерна которых достигают размеров от 0.5 до 2 мм (рис. 1). Выделения ортопироксена

в хондрах менее крупные, чем у оливина, но более многочисленные. Визуально в шлифе и по данным площадных микронзондовых анализов количество оливина и ортопироксена в хондрах в среднем приблизительно оценивается величинами порядка 50% и 30% соответственно. Помимо главных минералов (оливин и ортопироксен) в хондрах присутствуют: диопсид (около 10%) и плагиоклаз (около 10%), мелкозернистые выделения которых располагаются в интерстициях между зернами оливина и ортопироксена. В качестве акцессорных минералов в хондрах установлены троилит, хромит и никелистое железо. Некоторые зерна оливина и пироксенов проявляют волнистое погасание, что может свидетельствовать об ударном воздействии, которое испытало метеоритное тело.

В хондрах отмечаются агрегатные выделения иногда овальной формы и размером до 0.2 мм с тонколучистой структурой (рис. 2). Тонколучистые образования в этих агрегатах представлены срастаниями мелких вытянутых зерен ортопироксена с параллельной друг другу оптической ориентировкой. Они составляют основу этих агрегатов. В промежутках между этими лучами, а иногда и внутри лучей располагаются тонкозернистые выделения диопсида, плагиоклаза и стекла полевошпатового состава. По данным площадных микронзондовых анализов эти агрегаты сложены на 60% ортопироксеном, на 25% диопсидом и на 15% кислым плагиоклазом и стеклом полевошпатового состава. Иногда в их составе в небольшом количестве отмечается мелкозернистый оливин. В качестве акцессорных минералов в десятых долях процента присутствуют троилит, хромит, ильменит. По составу и строению эти лучистые агрегаты резко контрастируют основному материалу хондр и связующей массы. Более того, эти агрегаты иногда имеют овальные формы. Все это позволяет предполагать, что они являются самостоятельными минеральными образованиями, а именно хондрами более раннего поколения, метасоматически преобразованными в агрегат пироксен-плагиоклазового состава, в котором иногда сохраняются мелкозернистые реликты оливина.

Связывающая хондры масса в метеорите представлена мелко-среднезернистым агрегатом, сложенным теми же минералами, что и хондры, и в тех же количественных соотношениях. Главными минералами являются оливин и ортопироксен. Второстепенные – диопсид, плагиоклаз. Акцессорные – троилит, хромит, никелистое железо и ильменит.

Корочка поверхностного оплавления представлена скрытокристаллическим тонкозернистым агрегатом, имеющим под микроскопом темный цвет. Она сложена стеклом диопсид-полевошпатового состава (по данным микронзондовых анализов), очень мелкими зернами оливина, пироксена и недоплавленными более крупными (до 0.1 мм) фрагментами оливина, ортопироксена, хромита и троилита (рис. 3). В составе корки плавления микронзондовым анализом дополнительно обнаружен меррилит $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$.

Микронзондовые точечные и площадные анализы шлифа метеоритного вещества показали следующие дополнительные результаты. Значения железистости оливина $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ в хондрах, связующей их массе и в корке плавления близки друг к другу. Величина коэффициента железистости $f = \text{Fe} / (\text{Mg} + \text{Fe})$ в оливинах варьирует в узких пределах, обычно от 0.25 до 0.31 и в среднем (по десяти анализам) составляет 0.28. Интересен факт понижения железистости оливина до 0.20 в зонах контакта оливина с крупными выделениями хромита.

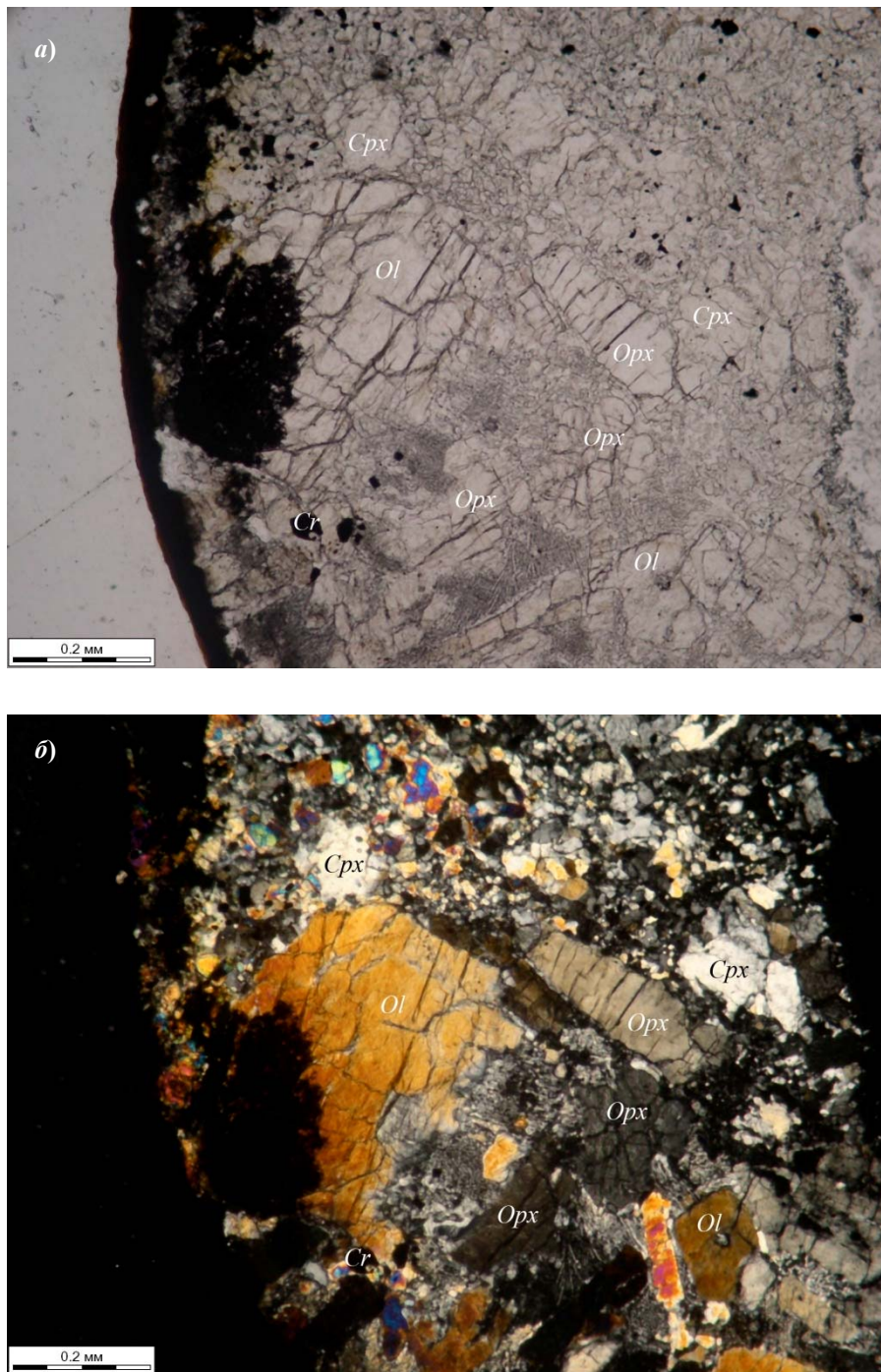


Рис. 1. Оливин-пироксеновый агрегат в краевой части хондры: *Ol* – оливин, *Orx* – ортопироксен, *Cpx* – клинопироксен, *Cr* – хромит, *Fe* – металлическое железо (*a* – при одном никеле, *б* – в скрещенных николях)

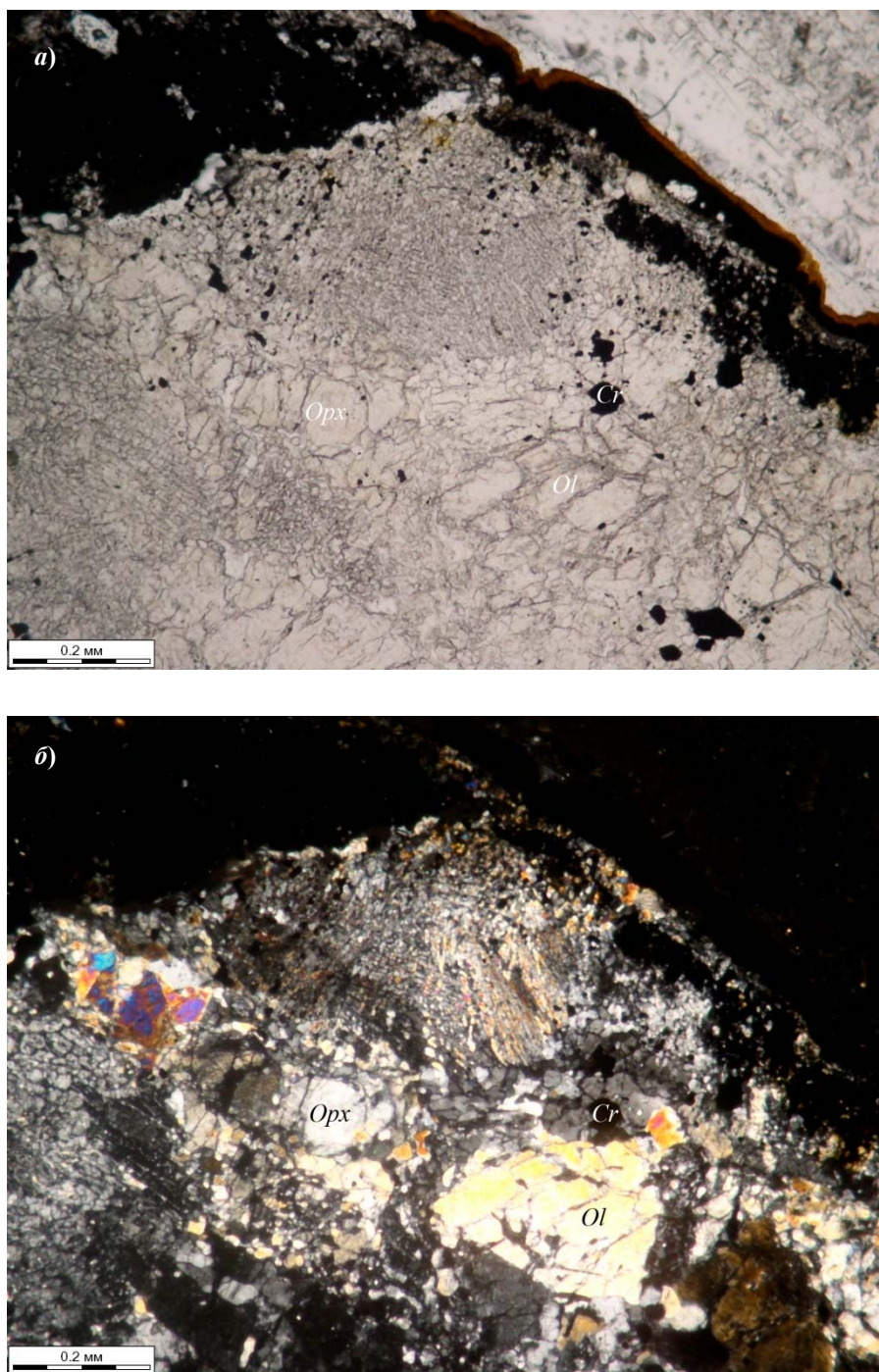


Рис. 2. Тонколучистый ортопироксен-плаггиоклаз-диопсидовый агрегат в хондре (в верхней части шлифа), *Tr* – троилит (*a* – при одном николе, *б* – в скрещенных николях)

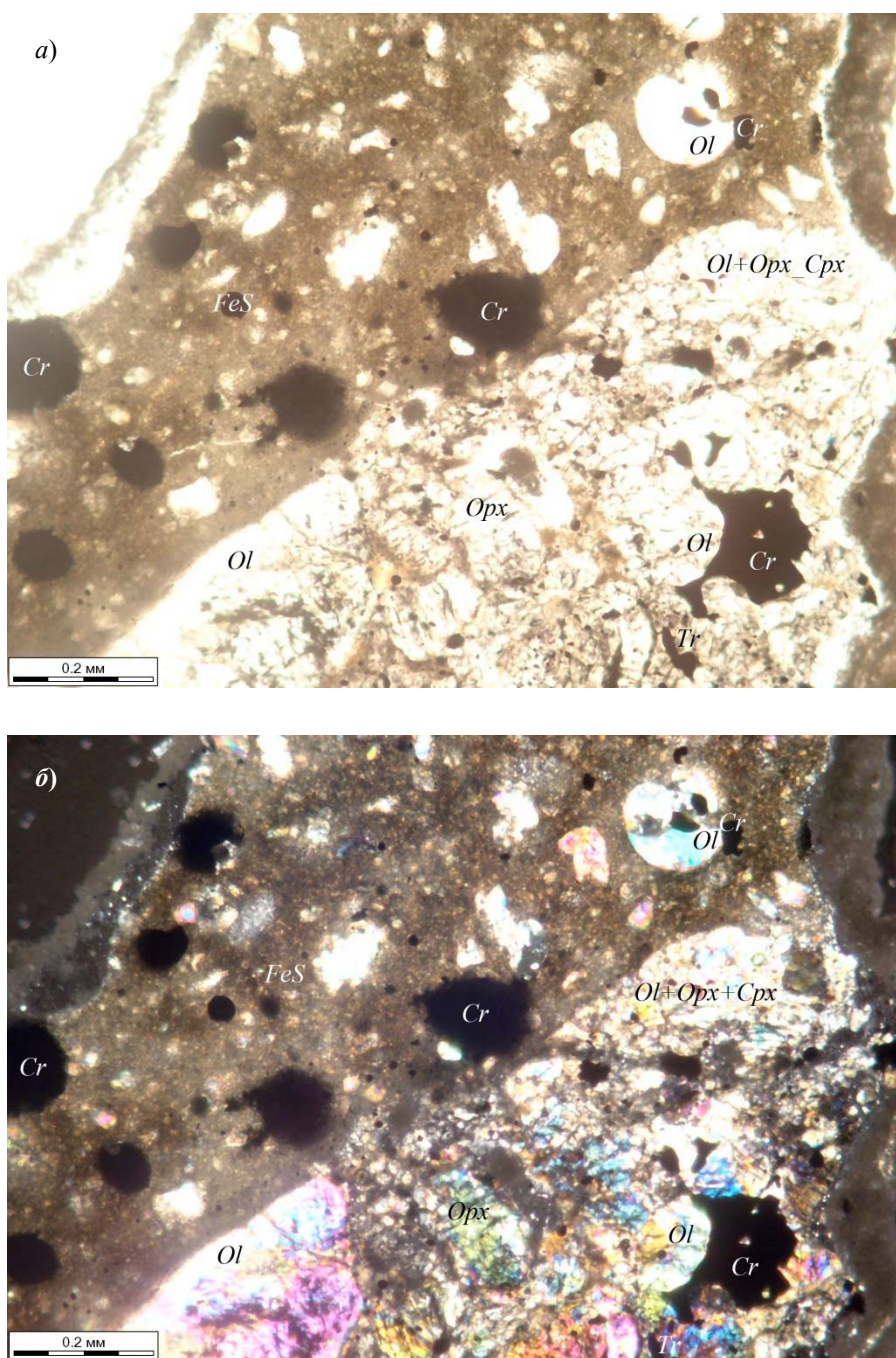


Рис. 3. Контакт корки оплавления (левая верхняя темная часть шлифа) и связующей оливин-пироксеновой массы (правая нижняя светлая часть шлифа, *a* – при одном николе, *б* – в скрещенных николях)

Значения железистости ортопироксена $(Mg,Fe)SiO_3$ в хондрах, связующей их массе и в корке плавления также близки друг к другу. Величина коэффициента железистости f в ортопироксенах варьирует в пределах 0.23–0.35 и в среднем

(по 14 анализам) составляет 0.29. Это свидетельствует о том, что ортопироксен представлен гиперстеном. Минимальные значения ($f = 0.23$) отвечают участкам, обогащенными рудными выделениями хромита и троилита. В агрегатах с тонколучистой структурой ортопироксен также характеризуется пониженной железистостью ($f = 0.23$), что подтверждает более раннее образование этих лучистых хондр.

Полевые шпаты в метеоритном веществе представлены альбитом-олигоклазом. По микронзондовым анализам номер плагиоклаза варьирует в пределах 0–25 и в среднем (по 14 анализам) равен 10. Содержание полевого шпата в среднем составляет около 10% (включая и стекловатую фазу).

Моноклинный пироксен в метеорите представлен диопсидом $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$. Величина его коэффициента железистости варьирует в пределах 0.20–0.34 и в среднем (по 10 анализам) составляет 0.27. Содержание диопсида в образце в среднем составляет около 10%. В агрегатах с тонколучистой структурой содержание диопсида повышается до 29% при железистости $f = 0.25$.

Помимо рассмотренных выше главных силикатных минералов в метеорите нами обнаружены акцессорные рудные минералы, представленные троилитом, хромитом и самородным железом. По данным площадных микронзондовых исследований мелкозернистых участков образца была произведена оценка приблизительного содержания этих минералов в метеорите. Получены приблизительные средние оценки их содержания: троилит – около 3%, металлическое железо – около 2.5% и хромит – около 2%. Кроме того, в единичных анализах был обнаружен ильменит в количестве десятых долей процента. В двух анализах был установлен фосфатный минерал мерриллит $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$ в десятых долях процента.

По данным точечных микронзондовых анализов мономинеральных выделений троилита FeS было установлено, что он обычно характеризуется дефицитом железа и этим напоминает пирротин Fe_{1-x}S . Величина дефицита железа, выражаемая параметром x , в исследуемых нами сульфидах железа метеорита Челябинск варьировала в пределах 0.07–0.20 и в среднем составила 0.13. Это позволяет отнести сульфид железа метеорита Челябинск к пирротину, с которым троилит имеет одинаковый тип симметрии и одинаковый тип структуры.

Микронзондовые анализы мономинеральных выделений хромита показывают, что хромит FeCr_2O_4 в метеорите Челябинск содержит значительное количество изоморфных примесей алюминия, магния, титана и небольшое количество ванадия и марганца. Усредненная по анализам формула хромита имеет вид $(\text{Fe}_{0.88}\text{Mg}_{0.11}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}(\text{Cr}_{1.62}\text{Al}_{0.27}\text{Ti}_{0.09}\text{V}_{0.02})_{2.00}\text{O}_4$, то есть хромит в метеорите в среднем содержит 81% хромитовой молекулы FeCr_2O_4 , 11% шпинелевой молекулы MgAl_2O_4 , 5% ульвитовой молекулы Fe_2TiO_4 , 2% галакситовой молекулы MnAl_2O_4 и 1% кулсонитовой молекулы FeV_2O_4 . Содержания этих молекул в хромитах метеорита варьирует в следующих пределах: FeCr_2O_4 – 78–83%, MgAl_2O_4 – 9–13%, Fe_2TiO_4 – 4–6%, MnAl_2O_4 – 0–3% и FeV_2O_4 – 0.9–1.1%.

Самородное металлическое железо метеорита Челябинск по микронзондовым анализам всегда содержит примесь никеля, то есть имеет формулу $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)$. Величина параметра x варьирует в пределах 0.1–0.4. Это свидетельствует о том, что металлическое железо в метеорите представлено смесью двух фаз: камасит ($\text{Ni} < 7\%$) и тэнит ($\text{Ni} > 7\%$).

Заключение

Наличие в образце метеорита хондр и доминирующий оливин-гиперстеновый минералогический состав хондр и связывающей их массы однозначно свидетельствуют о том, что метеорит Челябинск относится к каменным метеоритам класса обыкновенных хондритов. Для оценки, к какой химической группе относится данный метеорит, нами по результатам восьми площадных микронзондовых анализов с различных участков образца (хондры, связующая масса, корка оплавления) были вычислены средние значения двух параметров $Fe_{мет}/Fe_{общ}$ и $Fe_{общ}/Si$, представляющие собой отношения атомных количеств металлического железа $Fe_{мет}$, общего железа $Fe_{общ}$ и кремния Si в анализируемых участках образца. Величины этих параметров оказались следующими: $Fe_{мет}/Fe_{общ} = 0.13$ и $Fe_{общ}/Si = 0.43$. По этим значениям метеорит Челябинск можно однозначно отнести к химической группе LL-хондритов: в нем лишь малая часть железа находится в металлическом состоянии, а основная часть находится в окисленном состоянии и входит в состав силикатов [5]. Это косвенно также подтверждается отмеченной нами высокой железистостью оливинов и пироксенов. Полученные результаты не противоречат, хорошо согласуются и дополняют материалы, изложенные в работе [6], посвященной изучению вещества метеорита Челябинск широким комплексом разнообразных методов.

Литература

1. Хендерсон П. Неорганическая геохимия. – М.: Мир, 1985. – 339 с.
2. Заварицкий А.Н., Кваши Л.Г. Метеориты СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 248 с.
3. Маракушев А.А. Петрология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 311 с.
4. Mason B. Meteorites. – N. Y.: John Wiley & Sons, 1962. – 274 p.
5. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
6. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Конюшкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // Геохимия. – 2013. – № 7. – С. 580–598.

Поступила в редакцию
27.12.13

Бахтин Анатолий Иосифович – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и литологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

Шиловский Олег Павлович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых, Казанский (Приволжский) федеральный университет; ведущий специалист, Музей естественной истории Татарстана, г. Казань, Россия.

Осин Юрий Николаевич – директор Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия», Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: nau@hotmail.ru

* * *

STRUCTURE AND COMPOSITION OF THE CHELYABINSK METEORITE*A.I. Bakhtin, O.P. Shilovskii, Yu.N. Osin***Abstract**

A fragment of the meteorite exploded in the atmosphere above the city of Chelyabinsk on February 15, 2013 was studied. Chondrules with the mineral substance binding them, and the surface melting crust were found in the sample. Their mineralogical and chemical composition was determined. It was concluded that the meteorite belongs to the LL chemical group and the class of ordinary chondrites.

Keywords: meteorites, Chelyabinsk meteorite, chondrites.

References

1. Henderson P. Inorganic Geochemistry. Moscow, Mir, 1985. 339 p. (In Russian)
2. Zavaritskii A.N., Kvasha L.G. Meteorites of the USSR. Moscow, Izd. AN SSSR, 1952. 248 p. (In Russian)
3. Marakushev A.A. Petrology. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 1988. 311 p. (In Russian)
4. Mason B. Meteorites. N. Y., John Wiley & Sons, 1962. 274 p.
5. Voitkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. Guide to Geochemistry. Moscow, Nedra, 1990. 480 p. (In Russian)
6. Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alekseev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevastyanov V.S. Results of the speciation analysis of the Chelyabinsk meteor. *Geokhimiya*, 2013, no. 7, pp. 580–598. (In Russian)

Received
December 27, 2013

Bakhtin Anatolii Iosifovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Mineralogy and Lithology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Shilovskii Oleg Pavlovich – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Regional Geology and Mineral Resources, Kazan Federal University; Senior Specialist, Tatarstan Museum of Natural History, Kazan, Russia.

Osin Yurii Nikolaevich – Director, Interdisciplinary Centre for Analytical Microscopy, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
E-mail: nau@hotmail.ru