

ГЕОХИМИЯ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК

© 2013 г. К. Т. Пиллинджер*, Р. С. Гринвуд*, Д. Джонсон*, Дж. М. Гибсон*, А. Г. Тиндл*,
А. Б. Верховский*, А. И. Буйкин**, И. А. Франки*, М. М. Грэди*

**Planetary and Space Sciences, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, United Kingdom*
e-mail: Colin.Pillinger@open.ac.uk

***Институт Геохимии и Аналитической Химии им В.И. Вернадского РАН*
119991, ГСП-1, Москва, ул. Косыгина, 19
e-mail: bouikine@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

Зрелищное появление яркого болида над Западной Сибирью 15 февраля 2013 года было самым большим событием такого рода за последние более ста лет. Анализ изотопного состава кислорода показал, что этот объект относится к обычным хондрикам типа LL. Петрологические исследования показали, что материал метеорита относится к метаморфическому типу 5 и представлен двумя основными петрологическими типами, содержащими прожилки ударного стекла. Во всех трех типах материала были исследованы изотопный состав и содержание азота, углерода и благородных газов. Относительно низкие содержания азота и углерода предполагают, что метеорит Челябинск контаминирован в меньшей степени по сравнению с другими подобными образцами из метеоритной коллекции, что дает возможность более надежно идентифицировать эндогенные компоненты. Все исследованные образцы содержат минимальные количества космогенных и первичных благородных газов, что свидетельствует о значительном размере (не менее двух метров в диаметре) тела до его вхождения в атмосферу и что вещество метеорита было существенно дегазировано, как в процессе ударного метаморфизма на родительском теле, так и при взрыве в атмосфере Земли. В статье обсуждается явление падения метеорита Челябинск в сравнении с другими падениями такого масштаба, включая Тунгусский метеорит.

Ключевые слова: метеорит Челябинск, изотопы кислорода, азота и углерода, благородные газы.

DOI: 10.7868/S0016752513070133

ВВЕДЕНИЕ

В 9²² утра 15-го февраля 2013 года серия зрелищных атмосферных явлений над Западной Сибирью и Уралом возвестили о прибытии на Землю одного из самых больших внеземных объектов со времени тунгусского падения в 1908 году [1, 2]. Обстоятельства этого падения: яркий болид, мощный взрыв, вызвавший повреждения зданий и многочисленные травмы среди местного населения, были столь необычны, что эта новость в течение минут облетела Интернет и появилась на экранах телевизоров Европы и Америки. Существенный вклад в распространение этой информации в реальном масштабе времени внесли съемки персональными камерами и видео регистраторами.

Через очень короткое время стало ясно, что падение небесного тела сопровождалось взрывом, звук которого был слышен далеко за пределами Челябинска. Огромный интерес к этому явлению был обусловлен не только естественным желанием понять природу внеземного объекта с научной точки зрения и объяснить это населению, но также и потому, что это может пролить дополнительный свет на то, что случилось над Тунгусской более века назад [1]. В связи с полити-

ческой ситуацией в России в начале 20-го века и по причине чрезвычайной удаленности и труднодоступности района Тунгуски (более 2000 км восточнее Челябинска), первая экспедиция под руководством Леонида Кулика прибыла на место падения для сбора научного материала о падении только почти через 20 лет. В результате этого практически никаких твердых компонент, которые могли бы относиться к тунгусскому телу, найдено не было [3].

Поскольку район Челябинска густонаселен и люди сейчас в целом хорошо осведомлены о природе метеоритов, большое количество (возможно тысячи) обломков метеорита, выпавшего в виде метеоритного дождя, было собрано в районе поселков Первомайское, Депутатское и Яманже-линка в 40 км южнее Челябинска [4]. Большая часть собранного материала представляет собой мелкие округлые фрагменты. Другие примеры падения метеоритов подобной природы включают Holbrook (США, Аризона, 1912 г.), где фрагменты обнаруживают по сей день [5], и Pultusk (Польша, 1868 г.), представлявший собой самый большой из наблюдавшихся метеоритный дождь, выпавший в виде 60–70 тысяч отдельных фрагментов [6]. Оба этих падения произошли задолго до то-

го, как стало возможным исследовать образцы метеоритов непосредственно после их падения.

Обломки метеорита Челябинск были обнаружены в снегу, покрывающем весь регион толщиной примерно 0.7 м [4]. Поскольку обломки во время падения были нагреты, они расплавляли снег и образовывали каналы, которые оставались в снегу в виде трубок фирна. Эти каналы были хорошо видимы с поверхности, являясь своего рода маркерами возможного присутствия метеоритных образцов при их поисках. Большие фрагменты проходили через снежный покров до замерзшего грунта. Самый большой найденный обломок имеет вес 1.8 кг. Предполагается, что, по крайней мере, один, еще больший, фрагмент упал на дно озера Чебаркуль в 70 км западнее Челябинска, пробив покрывавший его лед, о чем свидетельствуют мелкие фрагменты, найденные на кромке образовавшейся полыньи диаметром 8 м.

Представлялось исключительно важным исследовать образцы метеорита Челябинск как можно быстрее после их сбора для того чтобы получить информацию, которая может быть потеряна по прошествии времени. Предполагается, что образцы метеоритов, собранные даже после 1 месяца после падения, уже существенно изменяются. Например, это относится к изотопному составу кислорода [5]. Также хорошо известно, что происходит неизбежное биологическое загрязнение, влияющее на изотопный состав азота и углерода, несмотря на специальные методы предосторожности при хранении и подготовке к анализу взятых образцов [7].

Открытый Университет (Великобритания) располагает набором аналитической техники для анализа легких элементов и их изотопов, что необходимо при исследовании уникальных метеоритов, таких как Челябинск. Мы обратились с просьбой о предоставлении нам образцов к академику Э.М. Галимову в Институт Геохимии и Аналитической Химии им. В.И. Вернадского Российской Академии Наук через The Royal Society, и при посредничестве атташе по науке Посольства Великобритании в Москве. Результаты исследования трех образцов, любезно предоставленных нам в ответ на нашу просьбу, приводятся в настоящей публикации.

ИССЛЕДОВАННЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для настоящего исследования было представлено два фрагмента Челябинского метеорита размером с гальку, почти полностью покрытых коркой плавления. Они были доставлены в Открытый Университет в г. Милтон Кинс в течение трех недель после ударного события. Один из фрагментов преимущественно состоял из светлой породы и был обозначен как “петрологический тип А”. Другой фрагмент довольно сильно отличался от первого, был более тонкозернистым, бо-

лее темным и был обозначен как “петрологический тип В”. Вес этих образцов был следующим: фрагмент петрологического типа А — 4.82 г, фрагмент петрологического типа В — 5.43 г. Внешний вид обоих фрагментов до распиловки представлен на рис. 1 и 2. На этих же рисунках показано, в какой плоскости происходила распиловка образцов с использованием алмазного диска с водяным охлаждением. Поверхности среза образцов были сфотографированы (рис. 3, 4), и из каждого были изготовлены шлифы.

Из описания, данного в официальной классификации Челябинского метеорита [4, 8], следует, что наш петрологический тип А соответствует тому веществу, которое составляет большинство (~2/3) найденных обломков метеорита, и описано как имеющее “типичную хондритовую структуру” (см. ниже более подробное описание). Меньшее, но все же значительное, количество собранных обломков (~1/3), состоит из темного, тонкозернистого материала ударного расплава. Из официального описания Челябинских образцов следует, что последний соответствует нашему петрологическому типу В (см. ниже более подробное описание).

В петрологическом типе А ясно видны тонкие, темные жилки ударного расплава, секущие образец (рис. 3). Они были отобраны и проанализированы для сравнения с двумя главными петрологическими типами, составляющими метеорит.

В дополнение к двум более крупным фрагментам, проанализированным в этой работе, позже был изучен небольшой кусок, взятый из другого образца метеорита. Этот материал был отправлен позже первых двух по почте и представлял собой тонкую пластинку длиной 6 мм. Он в основном состоял из главного петрологического типа А, но также содержал легко извлекаемый материал темного ударного расплава.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Оптическая микроскопия. Шлифы, приготовленные из образцов, представляющих петрологические типы А и В, были изучены с использованием стандартной оптической техники на петрографическом микроскопе Zeiss Axioplan.

Виртуальный микроскоп. Фотографии высокого разрешения шлифов, представляющие оба петрологических типа, были сделаны для дальнейшего использования на разработанном в Open University Виртуальном микроскопе — комплексе программного обеспечения, позволяющем производить различные манипуляции с изображением шлифов. В частности, такое изображение может быть исследовано на компьютере, который с помощью этой программы позволяет воспроизвести все возможности петрографического микроскопа. Программа заменяет исходное изображение образца мозаикой из примерно сотни отдельных фотографий, которые соединяются



Рис. 1. Фотография фрагмента, представленного петрологическим типом А и приблизительная линия распила. Образец удерживается на круглой пластиковой подложке. Размер образца 19 мм.



Рис. 2. Фрагмент, представляющий петрологический тип В до распила. На фотографии видна стекловатая текстура образца и приблизительная линия распила. Размер образца 19 мм.

между собой без швов и каждая из которых представлена в трех видах: в обычном поляризованном свете (PPL), в скрещенных николях (XPL) и в отраженном свете. Все три этих изображения тщательно совмещаются и затем подвергаются операции “масштабирования” с тем, чтобы изображение могло бы быть исследовано с использо-

ванием адаптированного HTML5 виджета. Этот виджет позволяет пользователю переключать изображения в зависимости от источника света, изменять его масштаб или проводить прецизионные измерения размеров. Отдельные наиболее интересные участки шлифа фотографируются обычным поляризационным микроскопом с вра-

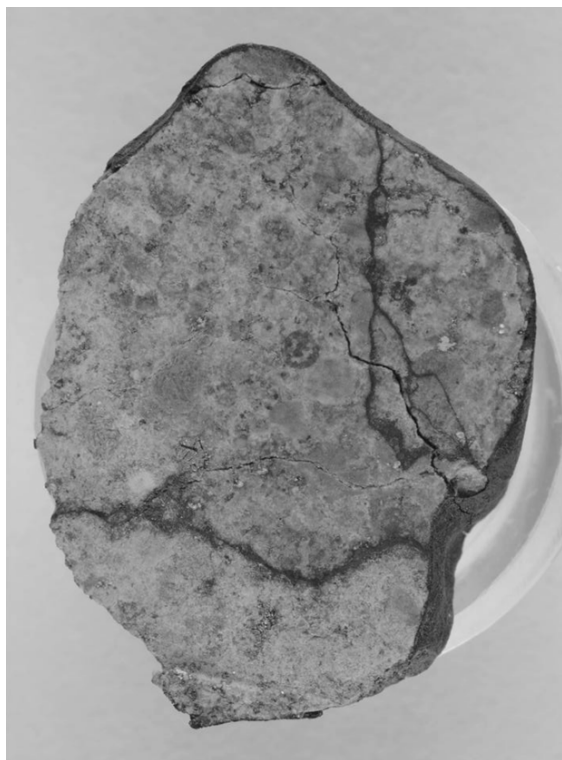


Рис. 3. Поверхность распила образца петрологического типа А. Наибольший его размер 19 мм. Видны пересекающиеся его прожилки ударного расплава.

щающимся столом. Каждый такой участок фотографируется с интервалом поворота на 5° как в обычном поляризованном свете, так и при скрещенных николях. 144 таких отдельных изображения передаются затем во второй HTML5 виджет, который может быть использован оператором для симуляции функций оптического микроскопа. Виджет имеет сглаживающий алгоритм, так что суммарный эффект сравним с видео изображением, но с гораздо более высоким разрешением. В виджете имеется один переключатель между режимами PPL и XPL и другой — для включения или остановки вращения.

Сканирующий электронный микроскоп. Электронные изображения и вещественный анализ производились на приборе FEI Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении 20 kV и токе 0.6 нА в режиме высокого вакуума. Образцы обоих петрологических типов анализировались в виде покрытых золотом шлифов. Химический состав определялся полуколичественным методом с помощью дисперсионного рентгеновского спектрометра (Oxford Instruments) с 80-мм-Хмах детектором и программы Inca (v 4.13).

Изотопия кислорода. Изотопный состав кислорода определялся с помощью системы лазерного фторирования [9]. Все данные были получены на навесках около 2 мг, которые подвергались нагреву в атмосфере BrF_5 . После фторирования выде-

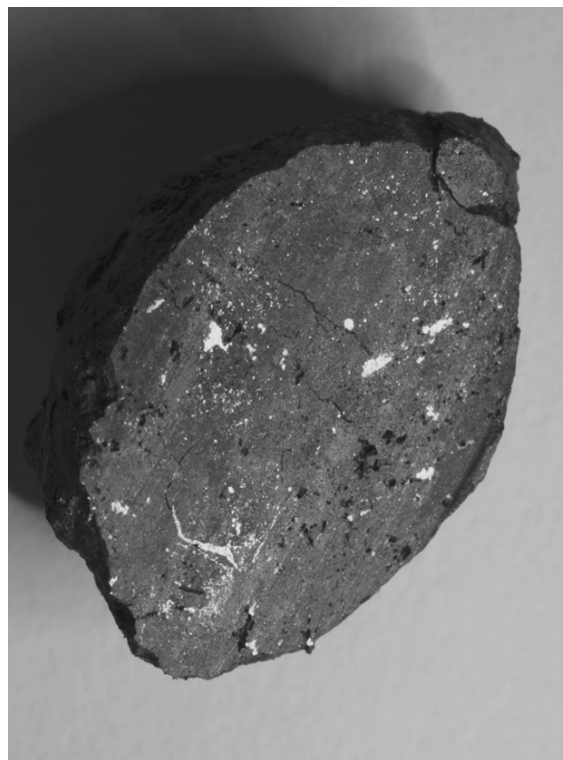


Рис. 4. Поверхность распила образца петрологического типа В, который также имеет наибольший размер 19 мм. Видны многочисленные вкрапления сульфидов.

ленный кислород очищался на двух ловушках, охлаждаемых жидким азотом, и с помощью нагретого КВт. Молекулярный кислород анализировался на масс-спектрометре MAT-253 с двойной системой напуска. Точность измерений (1σ), основанная на многократных анализах международных (NBS-28 кварц и UWG-2 гранат) и лабораторных стандартов, составляет примерно $\pm 0.04\text{‰}$ для $\delta^{17}\text{O}$, $\pm 0.08\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 0.024\text{‰}$ для $\Delta^{17}\text{O}$ [9]. Проанализированные образцы пудры были получены путем тщательного дробления материала, представляющего оба петрологических типа, а также выделенного из прожилков ударного плавления, ассоциированных с петрологическим типом А. 2-х мг образцы, использованные для повторных анализов каждого из петрологических типов А и В, были взяты из тщательно гомогенизированной большей (100–200 мг) пробы. Материал ударного расплава, отобранный вручную, имел общую массу около 20 мг. Точность измерения (1σ), приводимая для индивидуальных образцов, основана на повторных измерениях.

Данные по изотопному составу кислорода приводятся стандартным образом как относительные отклонения от изотопного состава стандарта: $\delta^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{обр}}/({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{ст}} - 1] \times 1000 (\text{‰})$ и аналогичным образом для $\delta^{17}\text{O}$, используя отношение ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$. $\Delta^{17}\text{O}$, представляющее собой от-

клонение от линии земного фракционирования, вычислялось как $\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$.

Углерод, азот и благородные газы были проанализированы в образцах, представляющих оба петрологических типа и жилы ударных расплавов. Образцы весом 5–10 мг подвергались ступенчатому окислению в температурном диапазоне от 200 до 1400°C. После очистки и криогенного разделения выделенные газы (углерод в виде CO_2) анализировались одновременно на трех масс-спектрометрах представляющих единый аналитический комплекс Финесс [10, 11], в статическом вакуумном режиме. При этом, кроме изотопного состава, определялось также и количество каждого газа. Образец метеорита Саратов (L4), упавший около 100 лет назад, был проанализирован для сравнения. Полученные данные представлены в виде выхода элементов в нанограммах или ppm на ступень выделения или как суммарный выход, интегрированный для всех ступеней, вместе с изотопным составом C и N в виде относительных отклонений δ , аналогично тому, как это описано выше для кислорода.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Петрологический тип А

Исходный образец: Фрагмент петрологического типа А был частично покрыт корой плавления (рис. 1). Примерно одна треть поверхности образца была затемнена, будто была подвержена нагреву. Но полноценная кора плавления здесь не образовалась и, таким образом, отдельные кристаллы/хондры могут быть видны на поверхности. Оставшиеся две трети образца были покрыты тонкой черной/коричневой стеклянкой коркой. Местами эта кора была повреждена, и обнажалась светлая зернисто-структурированная порода. Среди доминирующего материала силикатной матрицы отчетливо были видны неровные блестящие частички неизмененного металлического железа и золотисто-желтые кристаллы сульфида железа. Содержание свободного металла было относительно низкое. Явных трещин или прожилков видно не было. После резки (рис. 3) стало очевидным, что образец является хондритовым, и можно было увидеть несколько хорошо различимых колосниковых оливиновых хондр, и других, хуже идентифицируемых, но все же различимых, хондр. Цвет хондр варьировал от темно-серого до близкого к белому. Некоторые показывали зональность. Между хондрами были рассеяны неровные фрагменты металлического железа и сульфида. Самый крупный фрагмент достигал примерно 0.5 мм в поперечнике. Общее содержание металла и сульфидов можно было оценить не более чем в 5 об. %. Поверхности среза крест-накрест пересекали прожилки темного расплава (рис. 3). Они варьировали по толщине от 1 мм до микроскопических размеров. Некоторые расплав-

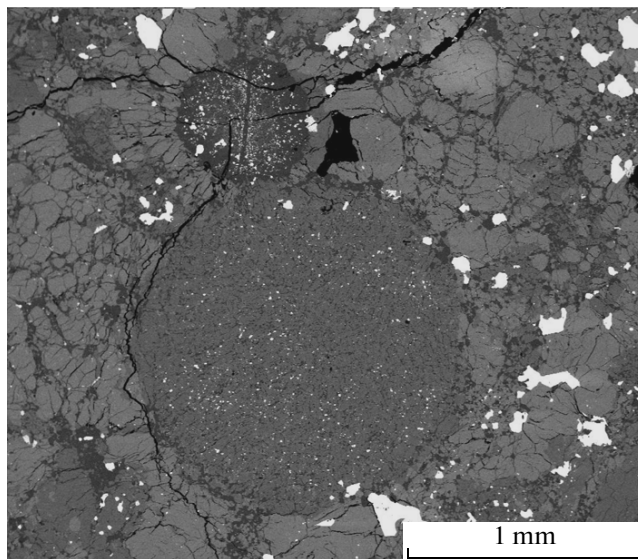


Рис. 5. Изображение образца А в обратно отраженных электронах, показывающее хондру типичного размера, состоящую из кристаллов авгита с полевошпатовым мезостазиом; яркие пятна, видимые на этом изображении, представлены зернами троилита неровной формы, присутствующими во всех образцах Челябинска.

ные прожилки резко оканчивались, в то время как другие полностью пересекали образец.

Шлиф/SEM: В полированной пластине под петрологическим микроскопом и при сканировании на электронном микроскопе было обнаружено, что петрологический тип А содержит множество цельных и частичных хондр различных типов, включая колосниковый оливин, радиальный пироксен и порфириновый оливин, на фоне матрицы, богатой оливином и пироксеном (рис. 5 и 6).

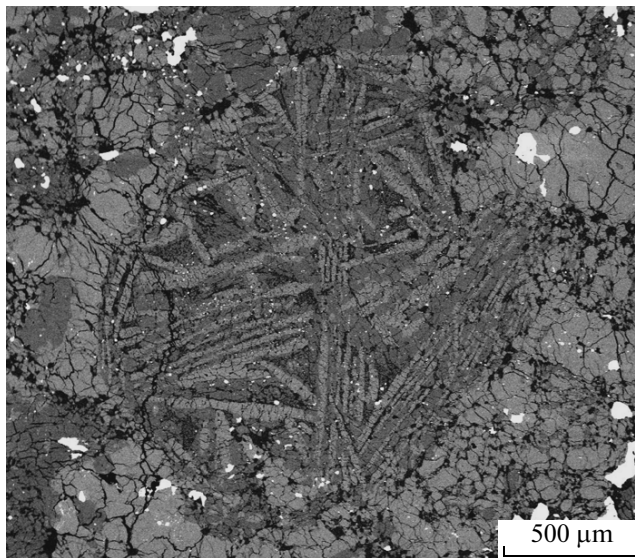


Рис. 6. Изображение в обратно отраженных электронах, показывающее фрагмент колосниковой оливиновой хондры в петрологическом типе А.

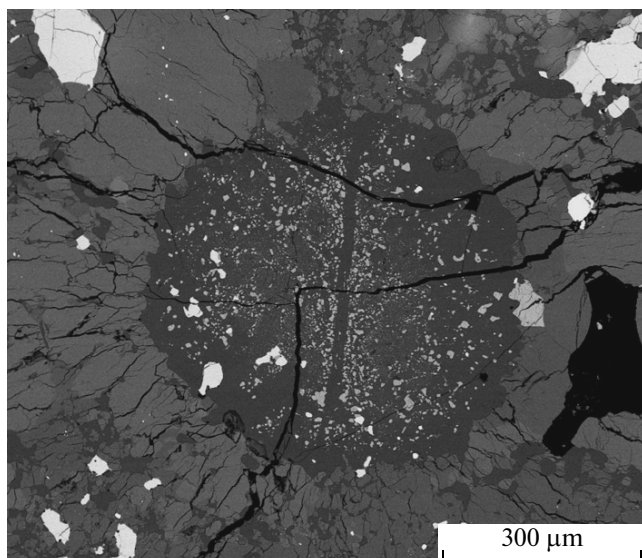


Рис. 7. Изображение петрологического типа А в обратно отраженных электронах, показывающее структуру полевошпатового расплава, содержащего много зерен хромита, белые неровные зерна вокруг — троилит.

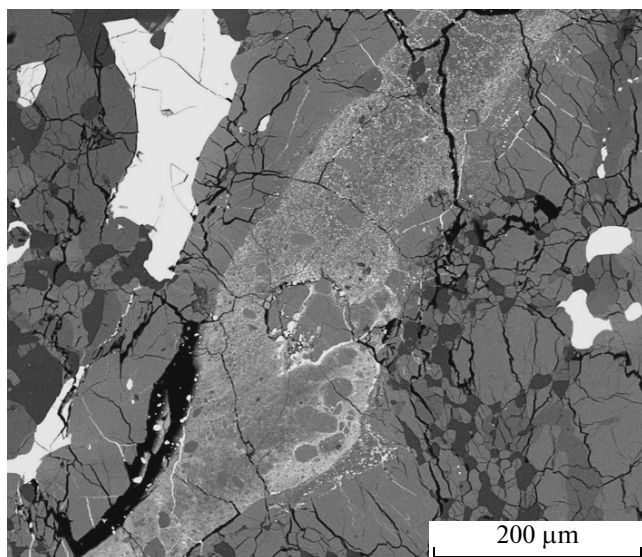


Рис. 8. Изображение петрологического типа А в обратно отраженных электронах, показывающее расплавную жилку, содержащую тонкие зерна оливина, несколько фрагментов которого достигают 50 мкм; в расплавной жилке также присутствуют троилит и FeNi.

Оливин в обоих петрологических типах А и В имеет состав Fe_{72} , в соответствии с официальной классификацией Челябинска [8], указывая на то, что этот метеорит является обыкновенным хондритом LL-группы. Металл присутствует в основном в виде неровных зерен тэнита, которые составляют не более 2 об. % в обоих образцах. Троилит также присутствовал (в несколько большем

количестве) в виде неровных зерен, но был отмечен и в виде полосок субмикронных включений вдоль отожденных трещин внутри зерен оливина. В петрологическом типе А присутствовал полевошпатовый расплав сферической формы, содержащий много небольших фрагментов хромита и секущийся множеством трещин (рис. 7). Степень перекристаллизации хондр в образце петрологического типа А предполагает, что метеорит представляет тип 5, что согласуется с официальной классификацией LL5 [8] и выводами работы [4]. На основании присутствия признаков плоской деформации и слабой мозаичности в оливине, ударная стадия метеорита Челябинск соответствует S4 [12]. Тонкозернистые ударные прожилки в петрологическом типе А в толщину обычно составляют 100–200 μm (рис. 3 и 8).

Петрологический тип В

Исходный образец: Фрагмент петрологического типа В (рис. 2) оказался довольно сильно отличным от петрологического типа А. В целом, он имел форму слезинки, и его поверхность была совсем темной и стекловатой. С любого конца откалывались тонкие пластины стекловатого материала. В отличие от фрагмента петрологического типа А, этот образец имел матовую поверхность и при близком рассмотрении, оказалось, что это вызвано множеством микрокристаллов и пор. Однако в целом, он был стекловатым. Внутри петрологический тип В оказался темно-серым, без характерных черт и стекловатый от ядра до края (рис. 4). При более близком рассмотрении было возможно увидеть немного более светлое стекловатое ядро, окруженное ближе к краю более темным материалом. Граница между двумя частями проходила посередине образца. Единственными особенностями, видимыми на микроуровне, были воронки — возможно полости, образованные при потере газа, — и несколько неровных фрагментов металлического железа, видимые лишь при сильном освещении. Один из этих металлических фрагментов оказался очень извилистым.

Шлиф/SEM: Исследование шлифа петрологического типа В на электронном микроскопе показали, что он состоит по большей части из ударного затемненного материала и показывает интенсивное развитие линз и жилок ударного расплава. В петрологическом типе В хондры четкие, но имеют тенденцию показывать более глубокую ударную проработку, чем в петрологическом типе А. Значительная часть образца состоит из материала ударного расплава, в свою очередь состоящего из небольших остатков минеральных зерен и глобул несмешивающихся сульфида/металла (рис. 9) в афанитовой матрице, как уже наблюдалось ранее [12]. Многие из остатков минеральных зерен в рас-

плавных жилках представляют собой угловатые оливины примерно 1 мкм в диаметре. Оливины в петрологическом типе В имеют такой же состав, как и в образце петрологического типа А (Fe_{72}).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изотопы кислорода. Изотопный состав кислорода не отличается для образцов, представляющих петрологические типы А и В, и измеренные составы для обоих образцов располагаются на краю поля для LL-хондритов (рис. 10) в диапазоне значений, известных для обыкновенных хондритов [13]. Мы интерпретируем петрологический тип В как ударный расплав или, по крайней мере, как вещество, претерпевшее более интенсивный ударный метаморфизм, чем вещество, относящееся к петрологическому типу А. Однако данные по изотопному составу кислорода не дают свидетельств присутствия материала ударника, отличного от материала родительского тела, который отождествляется с материалом петрологического типа А. Аналогично, материал темных стекловидных прожилков только очень немного отличается от исходного материала. Несмотря на то, что метеорит Челябинск содержит свидетельства ударного метаморфизма, который возможно имел пиковое давление 15 МПа, наблюдаемое для других LL-хондритов [14], нет оснований утверждать, что LL-хондриты испытали больший ударный метаморфизм, чем хондриты Н или L групп [12].

Углерод, азот и благородные газы. Как видно из Таблицы, общее содержание углерода и азота для материала обоих петрологических типов А и В низкое; для углерода это 341 ppm, $\delta^{13}C$ -28.5% и 137 ppm, $\delta^{13}C$ -27.7% , соответственно. Материал стекловидных прожилков содержит от 205 до 210 ppm углерода с $\delta^{13}C$ от -26.9 до -27.0% . Эти результаты согласуются с представлением о том, что расплавные прожилки представляют собой смесь материала типа А и В; небольшое обогащение тяжелым изотопом ^{13}C может быть объяснено изотопным фракционированием при потерях углерода.

После исследований Мура и Льюиса в 1967 году [15] совсем немного работ было посвящено присутствию углерода в обыкновенных хондритах петрологических типов выше 4-го; большинство исследователей предпочитали изучать образцы петрологического типа 3, которые содержат различные экзотические компоненты такие, например, как межзвездные реликты [16]. Большинство обыкновенных хондритов типа 4 и выше содержат меньше углерода, чем хондриты типа 3, в которых его 0.1–0.3 весовых %, за исключением некоторых образцов, где петрографические исследования показывают присутствие графита [16]. Наиболее свежие падения и образцы 4–6-го типов, собранные в Антарктиде, имеют весьма низкое содержание углерода, что свидетельствует о том, что многие образцы обыкновенных хон-

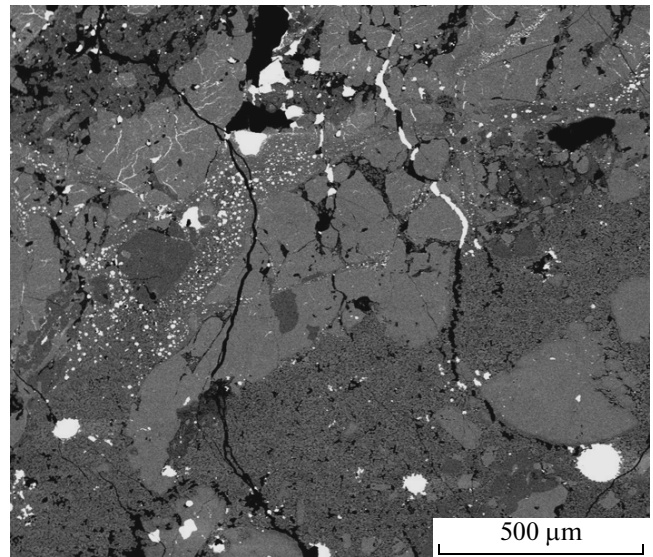


Рис. 9. Изображение в обратно отраженных электронах, показывающее типичный участок в образце В. В этом петрологическом типе присутствуют как тонкие ударные жилки (справа сверху), так и крупные жилы/пакеты расплава (справа внизу). Обширное расплавное образование, видимое внизу справа, содержит крупную (~50 μm), хорошо развитую глобулу несмешивающихся сульфида и металла [12].

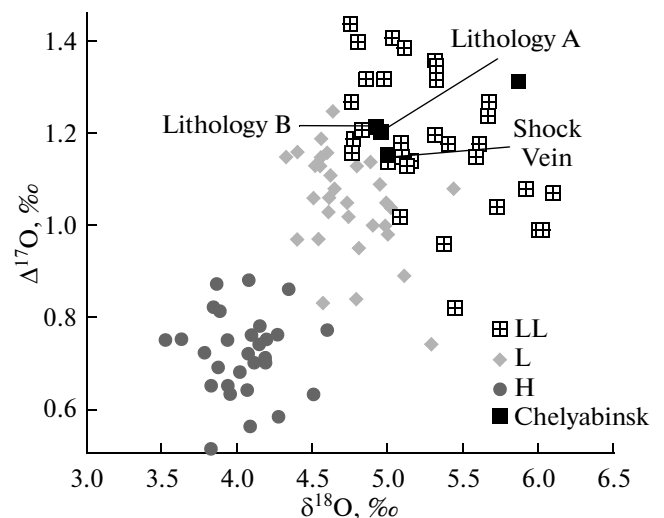


Рис. 10. Изотопный состав кислорода петрологических типов А, В и ударных прожилков в петрологическом типе А.

дритов высоких петрологических типов, данные для которых опубликованы, контаминированы земным углеродом. Поэтому низкие содержания углерода, обнаруженные в метеорите Челябинск, вероятно, представляют собой наилучшую оценку для LL5 хондритов.

Рассматривая более детально характер выделения углерода при ступенчатом окислении (рис. 11)

Валовые содержания и изотопный состав азота, углерода и благородных газов в исследованных образцах

Sample	Sample weight, mg	C, ng	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	N, ng	$\delta^{15}\text{N}$, ‰	$^{40}\text{Ar}^*$, cc ($\times 10^{-9}$)	^{36}Ar , cc ($\times 10^{-11}$)	^{132}Xe , cc ($\times 10^{-13}$)	^{21}Ne , cc ($\times 10^{-10}$)	^4He , cc ($\times 10^{-9}$)
Light A	4.946	1690	-28.5 ± 0.5	17	-2.6 ± 1	nd	<2	<5.0	<1.0	<1.0
Dark B	6.452	889	-27.7 ± 0.5	29	3.1 ± 1	44.0	<2	13	<1.0	<1.0
Shock melt	5.550	1166	-27.0 ± 0.5	45	3.5 ± 1	6.4	<2	<5.0	<1.0	<1.0
1-3 light + shock melt	10.151	2087	-26.9 ± 0.5	94	5.5 ± 1	nd	16	na	1.5	<1.0
Saratov	12.192	9587	-22.8 ± 0.5	191	6.4 ± 1	298.0	82	1000	7.0	161

Примечание. $^{40}\text{Ar}^*$ – радиогенный аргон, nd – не обнаружено, na – не анализировалось.

можно отметить, что образец А содержит компоненту углерода, сгорающую в диапазоне 600–1000°C с $\delta^{13}\text{C}$ между -24 и -30 ‰. Эта компонента имеет очень низкое содержание азота ($\text{C}/\text{N} > 100$) и поэтому, вероятно, может представлять собой графит или алмаз. Такая компонента также наблюдалась ранее в обыкновенных хондритах высоких петрологических типов после удаления земной контаминации при низкой температуре [16]. Это видно из данных по ступенчатому окислению образца А (рис. 11), где углерод почти полностью отсутствует в низкотемпературных (<400°C) ступенях, показывая, что метеорит Челябинск в наименьшей степени контаминирован земным углеродом по сравнению с другими обыкновенными хондритами 4–5 петрологического типов из метеоритной коллекции. Небольшое количество углерода, выделяющееся ниже 500°C, имеет отношение C/N 10–40, что, возможно, говорит о земном биологическом его источнике. Большая часть низкотемпературного азота выделяется при 200°C (рис. 11), свидетельствуя о его сорбции из атмосферы. Небольшое количество азота и углерода выделяется при высокой температуре (>1000°C).

Это, по-видимому, результат разложения неизвестных фаз или выделения из каких-то атомных положений в минералах.

Для сравнения, другой большой метеорит (Саратов), упавший в России, падение которого сопровождалось ярким, хорошо наблюдавшимся болидом, был также проанализирован методом ступенчатого окисления. Характер выделения углерода из этого образца (рис. 12), упавшего около 100 лет назад, ясно показывает, что он контаминирован легко окисляющимся углеродом, присутствие которого, скорее всего, связано с длительным хранением метеорита.

Несмотря на контаминацию, метеорит Саратов представляет важную аналогию для интерпретации данных по благородным газам метеорита Челябинск. Результаты, полученные для неона и аргона при ступенчатом окислении приблизительно 10 мг метеорита Саратов, показали, что легкие благородные газы должны были бы легко быть обнаружены в метеорите Челябинск с помощью системы анализа Finesse. Однако, ни в одном из трех видов исследованного материала не было установлено измеримых количеств легких благо-

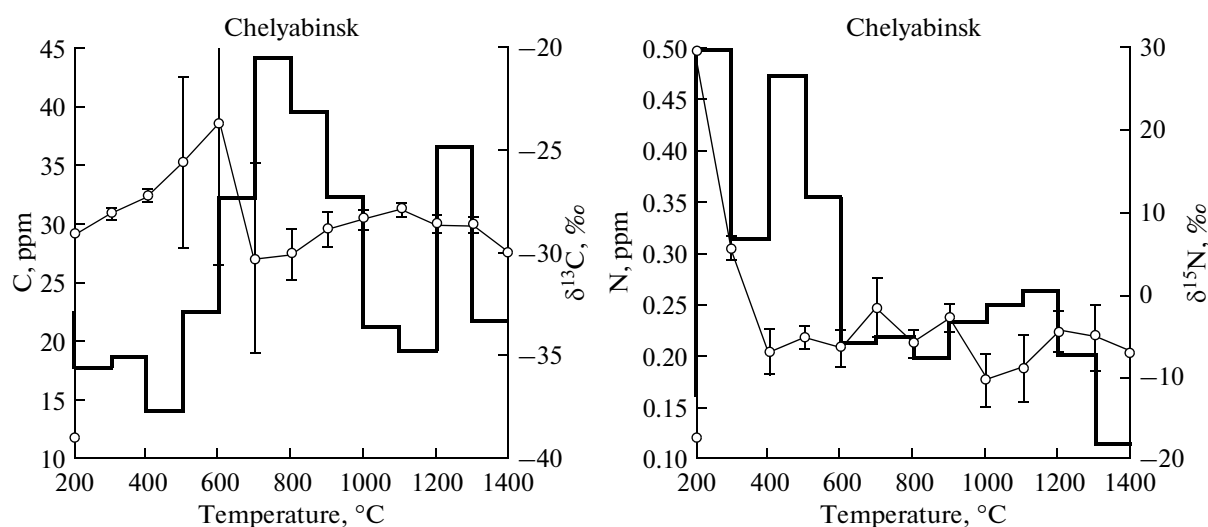


Рис. 11. Характер выделения азота и углерода и вариации их изотопного состава при ступенчатом окислении образца петрологического типа А.

родных газов. Дополнительная попытка обнаружить ^{21}Ne для вычисления космогенного возраста метеорита Челябинск была сделана для образца петрологического типа А, где были обнаружены треки солнечного космического облучения [4]. Используя большую навеску этого образца, удалось обнаружить небольшой избыток ^{21}Ne по сравнению с уровнем фона (см. таблицу).

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно [4, 8], большая часть (2/3) собранного материала метеорита Челябинск относится по составу к LL5. Петрографические исследования и анализ изотопного состава кислорода этого материала (петрологический тип А), предпринятые в настоящем исследовании, находятся в согласии с этой классификацией. Менее распространенный вид материала (петрологический тип В), составляющий 1/3 собранных образцов, содержит существенные свидетельства ударного воздействия (S4) в форме большей массы прожилков, заполненных ударным расплавом, а также присутствия потемневших от ударного воздействия силикатов [12]. Изотопный состав кислорода этого материала не отличается от более распространенного светлого (А) (рис. 10). Подобным же образом тонкие прожилки, пересекающие светлый материал (А), только очень незначительно отличаются по изотопному составу кислорода от содержащей их породы (рис. 10). Эти данные по кислороду предполагают, что в ударное плавление метеорита Челябинск не был вовлечен материал хондритов других групп, как это было обнаружено в хондрите L6 Peace River [17]. В метеорите NWA 869, представляющем собой реголитовую брекчию L3-6, большое количество кластеров ударного расплава имеют изотопный состав кислорода, отличный от основной массы материала, что свидетельствует о присутствии в этом метеорите материала ударника [18]. Факт отсутствия различия в изотопном составе кислорода между ударным расплавом и основной массой материала метеорита Челябинск может рассматриваться как свидетельство того, что вся масса метеороида образовалась на большой глубине родительского LL тела. С другой стороны, существует свидетельство того, что изученные фрагменты возникли в пределах самого метеорита (см. ниже). Более тщательное изучение фрагментов метеорита Челябинск может привести к обнаружению изотопных вариаций в зависимости от глубины в пределах метеороида. Образцы ударного расплава расположенные ближе к поверхности тела (до его вхождения в атмосферу) могут иметь вариации изотопного состава кислорода, аналогичные наблюдаемым в NWA 869.

Данные, полученные для углерода и азота, свидетельствуют о том, что большинство хондритов высоких петрологических типов, проанализированных до сих пор, существенно контаминированы.

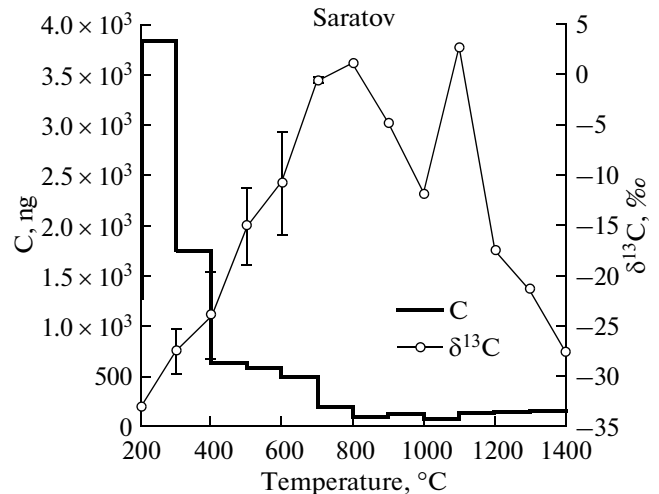


Рис. 12. Выделение углерода и его изотопный состав при ступенчатом окислении образца хондрита Саратов (L4).

Данные по С и N для метеорита Челябинск, вероятно, ближе всего отражают истинную распространенность этих элементов в этом типе материала.

Почти полное отсутствие легких благородных газов в исследованных образцах позволяет сделать некоторые выводы относительно Челябинского события. Тот факт, что космогенный ^{21}Ne был обнаружен только в одном образце и только в очень малом количестве, едва превышающем уровень фона, показывает, что исследованные образцы находились на глубине больше 1-го метра (приблизительный предел проникновения галактического космического излучения) в метеорите до его вхождения в атмосферу. Это хорошо согласуется с наблюдениями, которые предполагают, что Челябинский болид и мощность взрыва соответствуют размеру объекта примерно 17 м в диаметре.

Это также может означать, что разрушение этого объекта при взрыве сопровождалось существенной дегазацией. Действительно, практически полное отсутствие первичных благородных газов предполагает полную потерю летучих в процессе разрушения. В этом отношении интересно сравнить результаты для метеорита Челябинск с другими равновесными обыкновенными хондритами типа 4–6. Метеорит Саратов (L4), представленный одним найденным образцом весом более 300 кг, содержит как космогенный неон, так и первичные благородные газы, то есть не был дегазирован в такой степени, как метеорит Челябинск. Соответственно метеориты Holbrook (L/LL6) и Pultusk (H5) [20], тысячи отдельных окатанных обломков которых были найдены на поверхности, не только содержат космогенный Ne, что означает, что эти обломки происходят от тела диаметром не более 2-х метров, но также и первичные благородные газы. Болиды и взрывные явления, которые сопро-

вождали их падение более 100 лет назад, хотя и наблюдались на значительном расстоянии, были, вероятно, не такими мощными, как Челябинский. При всем этом, нельзя также исключить, что часть первичных благородных газов была потеряна в процессе ударного метаморфизма на родительском теле.

Наконец, природа объекта, вызвавшего Тунгусскую катастрофу, остается загадочной. Челябинское событие показывает, что относительно большой, механически прочный, метеороид, имеет возможность проникнуть глубоко в атмосферу, в результате чего испытывает катастрофическое воздействие аэродинамических сил, приводящих к мощному взрыву. В результате этого тело большого размера (до его вхождения в атмосферу) распадается на огромное количество мелких фрагментов. Эти фрагменты в свою очередь испытывают нагревание в атмосфере с образованием коры плавления и существенную дегазацию. В противоположность популярному научному мифу, фрагменты, очевидно, были горячими, когда выпадали на поверхность, расплавляя слой снега. В случае Тунгусского явления предполагается, что огромный каменный астероид взорвался на небольшой высоте, подобно Челябинскому, но с энергией взрыва достаточной для полной абляции разлетевшихся фрагментов [3]. Мелкие сферические продукты абляции были обнаружены в большом числе мест по всему земному шару [21]. Представляется важным вновь исследовать этот материал в свете Челябинского феномена.

Авторы выражают благодарность Академику Э.М. Галимову и Российской Академии Наук за предоставленные образцы, в результате чего эта работа стала возможной.

Мы также благодарим профессора Martin Poliakoff из Королевского Общества и Dr Julia Knights, Dr Марину Соколову и Ms Barbara Habberjam из Посольства Великобритании в Москве за их помощь в получении образцов. Благодарим Ms Michelle Higgins, Mr John Watson и Dr Judith Pillinger за их помощь в процессе выполнения работы в Open University. Частично работа была поддержана Science and Technology Facilities Council.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. V. 361. P. 40–44.
2. Bronshten V.A. The nature of the Tunguska meteorite // *Meteoritics & Planetary Science*. 1999. V. 34. P. 723–728.
3. Svetsov V.V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion // *Nature*. 1996. V. 383. P. 697–699.
4. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононова 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. 579–597.
5. Pillinger C.T., Greenwood R.C., Gibson J.M., Pillinger J.M., Gibson E.K. The Holbrook meteorite – 99 years out in the weather // 44th Lunar and Planetary Science Conference. 2013. Abstract # 2883.
6. Lang B., Kowalski M. On the possible number of mass fragments from Pultusk meteorite shower, 1868 // *Meteoritics*. 1971. V. 6. P. 149–158.
7. Swart P.K., Grady M.M., Pillinger C.T. A method for the identification and elimination of contamination during carbon isotopic analyses of extraterrestrial samples // *Meteoritics*. 1983. V. 18. P. 137–154.
8. Garvie L. et al. Chelyabinsk meteorite official classification write-up from *Meteoritical Bulletin* 101 (2013).
9. Miller M.F., Franchi I.F., Sexton A.S., Pillinger C.T. High precision $\delta^{17}\text{O}$ isotope measurements of oxygen from silicates and other oxides: Methods and Applications // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 1999. V. 13. P. 1211–1217.
10. Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Semjonova L.F. et al. C, N, and noble gas isotopes in grain size separates of presolar diamonds from Efremovka // *Science*. 1998. V. 281. P. 1165–1168.
11. Verchovsky A.B., Sephton M.A., Wright I.P., Pillinger C.T. Separation of planetary noble gas carrier from bulk carbon in enstatite chondrites during stepped combustion // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 199. P. 243–255.
12. Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. Shock metamorphism in ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 3845–3867.
13. Clayton R.N., Mayeda T.K., Goswami J.N., Olsen E.J. Oxygen isotope studies of ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 2317–2337.
14. Graf T., Marti K. Collisional records in LL-chondrites // *Meteoritics*. 1994. V. 29. P. 643–648.
15. Moore C.B., Lewis C.F. Total carbon content of ordinary chondrites // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 6289–6292.
16. Grady M.M. The content and isotopic composition of carbon in stony meteorites. University of Cambridge Ph. D Thesis. 1982.
17. Herd C.D.K., Friedrich J.M., Greenwood R.C., Franchi I.A. An igneous-textured clast in the Peace River meteorite: Insights into accretion and metamorphism of asteroids in the early Solar System // *Can. J. Earth Sci.* 2013. V. 50. P. 14–25.
18. Metzler K., Bischoff A., Greenwood R.C., Palme H., Gellissen M., Hopp J., Franchi I.A., Trierloff M. The L3-6 chondritic regolith breccia Northwest Africa (NWA) 869: (I) Petrology, chemistry, oxygen isotopes, and Ar-Ar age determinations // *Meteoritics & Planetary Science*. 2011. V. 46. P. 652–680.
19. Gibson E.K. Jr., Bogard D.D. Chemical alterations of the Holbrook chondrite resulting from terrestrial weathering // *Meteoritics*. 1978. V. 13. P. 277–289.
20. Schultz L., Kruse H. Helium, neon, and argon in meteorites: A data compilation // *Meteoritics*. 1989. V. 24. P. 155–172.
21. Ganapathy R. The Tunguska explosion of 1908 – Discovery of meteoritic debris near the explosion site and at the South Pole // *Science*. 1983. V. 220. P. 1158–1161.