

ЧЕЛЯБИНСКИЙ МЕТЕОРИТ

Академик Эрик ГАЛИМОВ, директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, председатель Комитета по метеоритам при Президиуме РАН

15 февраля 2013 г. произошло событие, привлечшее к себе всеобщее внимание: в 9 ч 20 мин местного времени в районе г. Челябинска были зарегистрированы вхождение в атмосферу и последующий взрыв болида, сопровождавшиеся сильной вспышкой. Ударная волна от события причинила ущерб городским постройкам, многих жителей ранило осколками выбитых оконных стекол. Падение небесного тела зафиксировали многочисленные любительские и служебные видеокамеры, благодаря чему удалось реконструировать траекторию болида и оценить параметры события. Географические координаты основной вспышки составляют приблизительно: $54,86 \pm 0,05^\circ$ с.ш. и $62,20 \pm 0,15^\circ$ в.д. Выделившаяся энергия оценивается около 440 кт в тротиловом эквиваленте, т.е. в 20 раз превосходит энергию взрыва атомной бомбы над Хиросимой (1945 г.). Считается, что масса небесного тела составляла около 10 тыс. т, а его размеры — 18–20 м. Скорость вхождения тела в атмосферу — порядка 20 км/сек. В атмосфере произошла фрагментация метеорита и на землю выпали многочисленные осколки, в большинстве случаев размером в несколько сантиметров.

Учет и первичное исследование выпавших метеоритов у нас в стране осуществлялся Комитетом по метеоритам при Президиуме РАН, работающим на базе Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ), где размещена также большая часть российской коллекции метеоритов. Отметим, российская коллекция метеоритов является одной из старейших и крупнейших в

мире. Это огромная культурная, научная и историческая ценность.

Задача Комитета по метеоритам состоит в сохранении и приумножении коллекции, осуществлении научных обменов, выделении вещества для исследования, проведении экспертизы, в том числе находок, предлагаемых населением, каталогизировании новых поступлений.



Фирновый столбик с метеоритом
(черное включение на конце).



Собранные образцы.

Понятно, что событие в районе Челябинска мы рассматривали как находящееся в зоне нашей ответственности с точки зрения поиска выпавшего вещества и идентификации его природы. Вот почему в понедельник, 18 февраля, мы начали готовить группу из числа сотрудников лаборатории метеоритики нашего института для выезда в Челябинск для поиска фрагментов метеорита. Я обратился к губернатору области Михаилу Юревичу с просьбой оказать содействие нашим специалистам. И оно было действительно оказано, за что мы признательны губернатору. В тот же день я связался с министром по чрезвычайным ситуациям РФ Владимиром Пучковым. Он сообщил, что сотрудники МЧС уже работают на месте. Министр также заверил, что необходимая помощь будет оказана. Надо сказать, что соответствующие местные службы были оперативны и с готовностью сотрудничали. На следующий день наша экспедиция под руководством заместителя

заведующего лабораторией метеоритики Дмитрия Бадюкова была уже в районе выпадения осколков метеорита. А через два дня первую партию образцов доставили в институт.

Сбор образцов, по описанию членов экспедиции, представлял собой относительно несложную задачу. Небольшие фрагменты оставляли заметное отверстие в снежном покрове. Вдоль траектории вхождения образовывался столбик льда. При извлечении последнего на дне его находили кусочек метеорита. Помимо научной группы поиск осуществляли многочисленные любители. Местное телевидение обратилось с просьбой к населению передавать найденные фрагменты нашим поисковикам. Такие случаи были, хотя и немного. В целом, мы собрали около 3 кг метеоритного вещества.

В институте были развернуты исследования, в которых участвовали несколько лабораторий. В том числе лаборатория метеоритики (заведующий доктор

Исследование метеоритного вещества проводилось в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН с использованием самой совершенной аналитической аппаратуры.

геолого-минералогических наук Михаил Назаров) — она является базовой Комитета по метеоритам и ответственна за петрологический анализ. Центральная аналитическая лаборатория (заместитель директора профессор Владимир Колотов), включая сектор микронного анализа (Наталья Кононкова) и сектор рентгено-флуоресцентного анализа (Ирма Рощина), выполняли химико-минералогический анализ. Лаборатория благородных металлов (заведующая доктор химических наук Ирина Кубракова) выполнила анализы содержания сидерофильных, халькофильных и редкоземельных элементов на ИСП-АЭС. Лаборатория геохимии изотопов (заведующий профессор Юрий Костицын) произвела в течение короткого времени чрезвычайно трудоемкие исследования Rb/Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) и Sm/Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) систем. В лаборатории геохимии углерода (доктор технических наук Вячеслав Севастьянов) был выполнен анализ изотопного состава углерода. В лаборатории космохимии (заведующий Виктор Алексеев) исследовали наличие следов (треков) космического облучения метеорита.

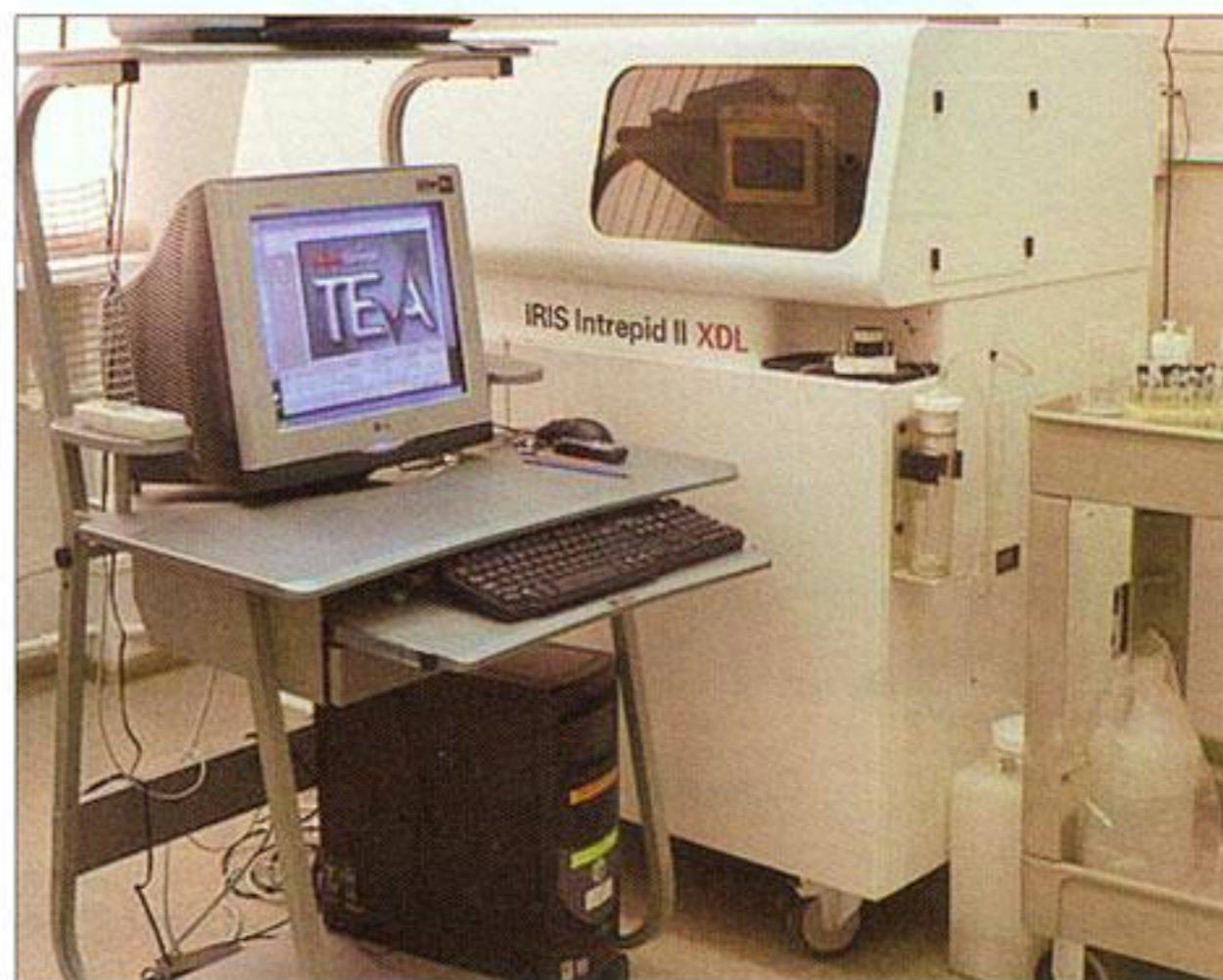
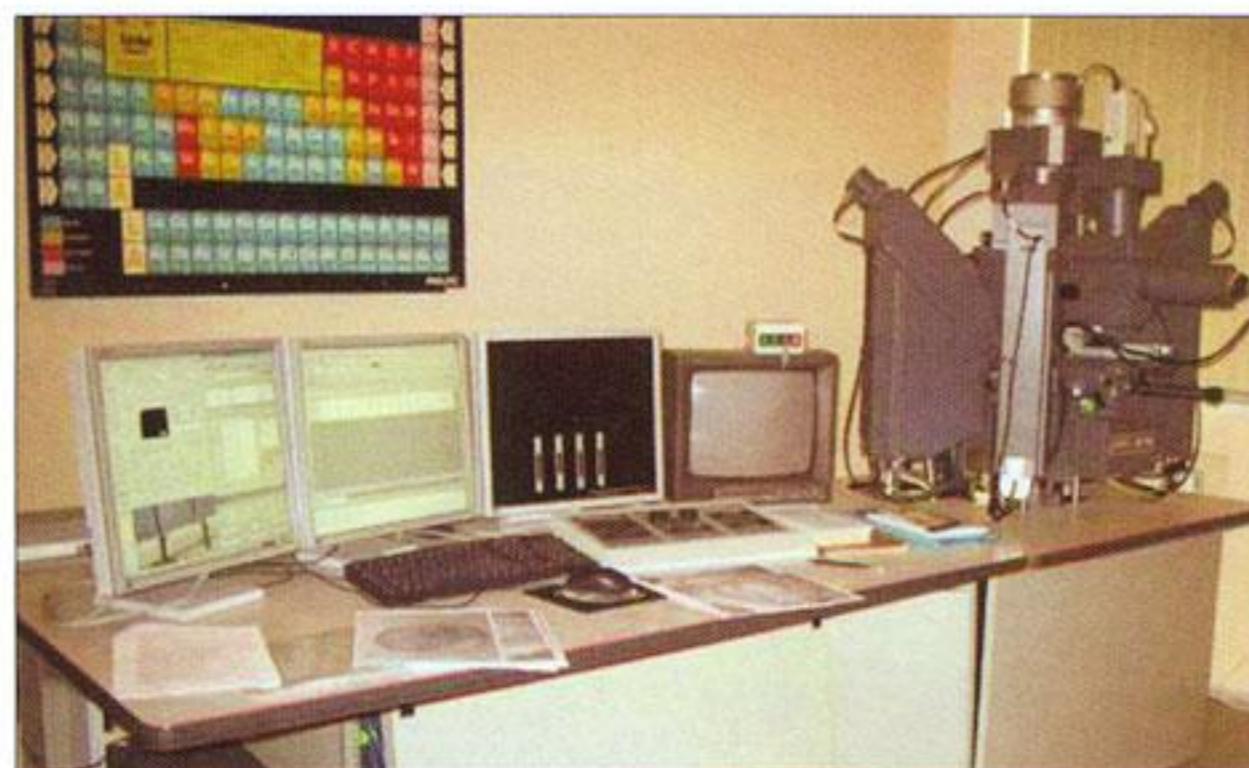
Задачи, которые стояли перед нами: 1) собрать материал; 2) идентифицировать вещество, если это — метеорит, то к какому классу он относится; 3) представить отчет в номенклатурный комитет Международного метеоритного общества для внесения метеорита в каталог и утверждения его названия.

Это была, так сказать, обязательная программа. Помимо того любой метеорит является объектом научного изучения: представляет интерес его возраст, происхождение, космическая история.

Метеориты бывают разных классов: железные, железо-каменные (палласиты), хондриты, ахондриты. К особым группам относятся марсианского (SNC) и лунного происхождения. Последние представляют осколки пород Марса и Луны, выбитые с их поверхности ударами астероидов и попавшие, в конечном счете, на Землю.

Хондриты составляют наиболее распространенную группу метеоритов. Они, в свою очередь, по химическому составу делятся на ряд групп. Наиболее интересны из них углистые: они ближе всего по составу к первозданному веществу. Причем углистые хондриты типа CI (Ivuna, Orgueil и др.) богаты углеродом и водой, содержат органическое вещество, в том числе аминокислоты и другие соединения, имеющие предбиологическое значение. В их составе сохранились межзвездные пылевые частицы, предшествовавшие образованию Солнца. Вот почему их рассматривают как стартовый химический состав Солнечной системы.

Другие типы углистых хондритов — CV, CO и т.п. — представляют в той или иной степени метаморфизованные объекты. Углистые хондриты — наиболее окисленный тип метеоритного вещества. В них присутствуют карбонаты, гидраты, а железо находится в



окисленной форме FeO. Наиболее восстановленными представителями хондритов являются энстатитовые хондриты EH и EL, содержащие железо в металлической и сульфидной форме. Наиболее же распространены так называемые обыкновенные хондриты. Они делятся на три группы: H-высоко-железные, L-низко-железные и LL-очень низко-железные.

В Челябинском метеорите под микроскопом хорошо различимы отдельные хондры. Это одна из наиболее древних минеральных структур, образовавшихся в Солнечной системе. Сегодня изотопные методы дают возможность достаточно точно определить возраст Солнечной системы. Он составляет 4 млрд 568 млн лет. Всего через 2 млн лет после того как вспыхнуло Солнце в окружавшей его паро-газовой небуле с остатками межзвездной пыли сконденсировались сначала CAI (кальций-алюминиевые тугоплавкие включения), а затем хондры. Они вошли в состав первичных твердых объектов (планетезималей), которые аккумулировались в тела астероидальных размеров. Затем в астероидах хондритовое вещество частично переплавилось, испытало магматизм и дифференциацию, в определенной мере подверглось тепловому метаморфизму, хотя частично сохранилось почти неизменным. Соударения астероидов между



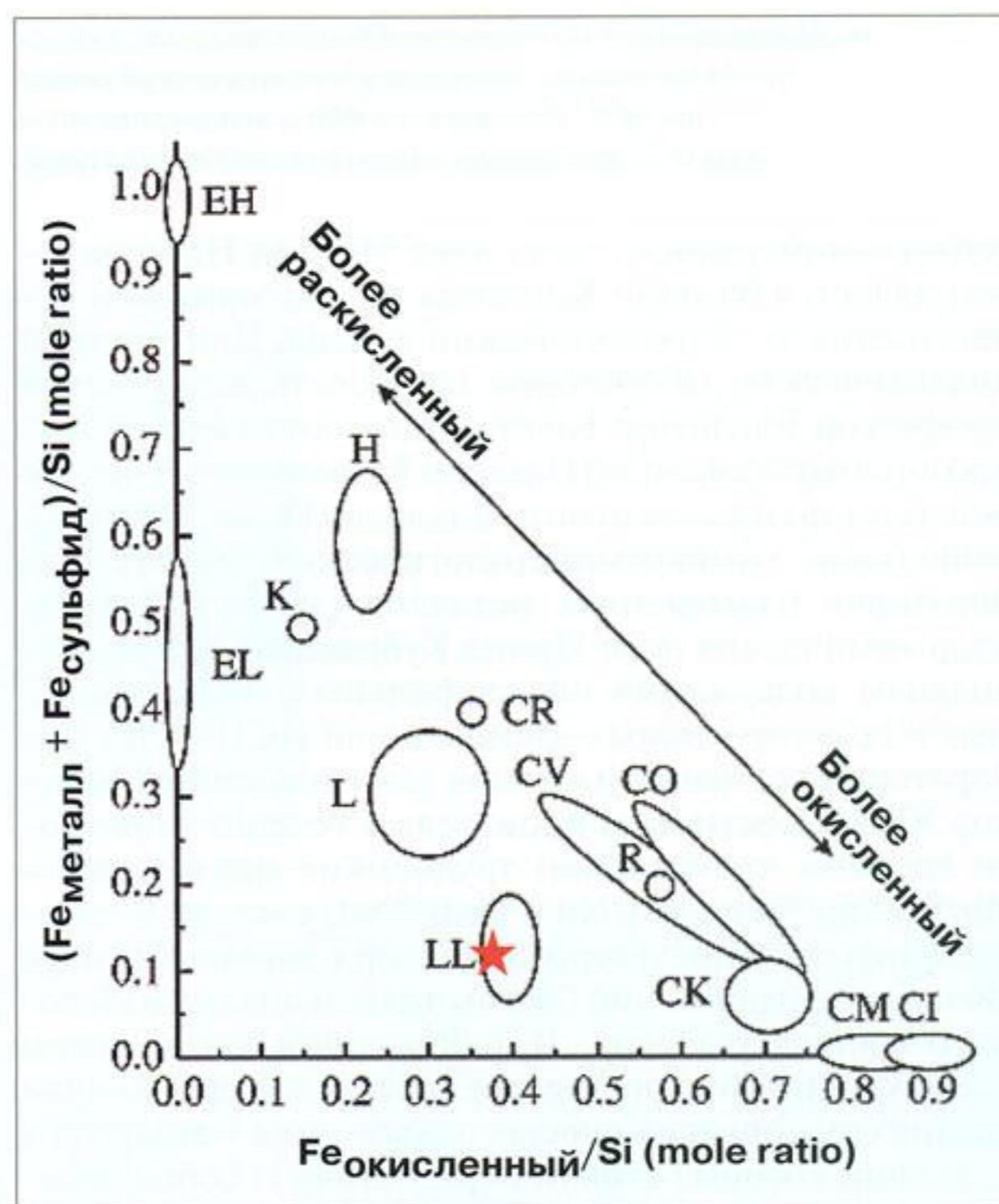
Один из образцов.

собой приводило к их фрагментации и порождению известных нам классов метеоритов.

Химический и петрологический анализы позволяют отнести исследуемый метеорит к определенному типу.

Содержание железа и соотношение его окисленной и восстановленной формы позволило отнести Челябинский метеорит к химическому типу LL. С этим согласуются также величины содержания фаялита (Fe_2SiO_4) в оливине и ферросилита (FeSiO_3) в пироксене. Таким образом, Челябинский метеорит относится к классу обыкновенных хондритов химической группы LL.

Следующий параметр, который должен быть определен для метеоритов этого класса — это петрологический тип. Таких типов всего семь. Первый представлен наименее измененным веществом — углистые хондриты, богатые водой и углеродом. Второй тип содержит хорошо сохранившиеся хондры, гидротермальное измененное вещество с достаточно высоким содержанием углерода. Более высокие типы, начиная с третьего, обнаруживают следы температурного метаморфизма, начиная с $400\text{--}600^\circ\text{C}$ — для третьего типа, $600\text{--}700^\circ\text{C}$ — для четвертого, $700\text{--}750^\circ\text{C}$ — для пятого, $750\text{--}950^\circ\text{C}$ — для шестого и свыше 950°C — для седьмого. С увеличением степени метаморфизма все менее отчетливыми становятся контуры хондр, более раскристаллизованной и грубозернистой становится матрица, более гомогенным состав основных минера-



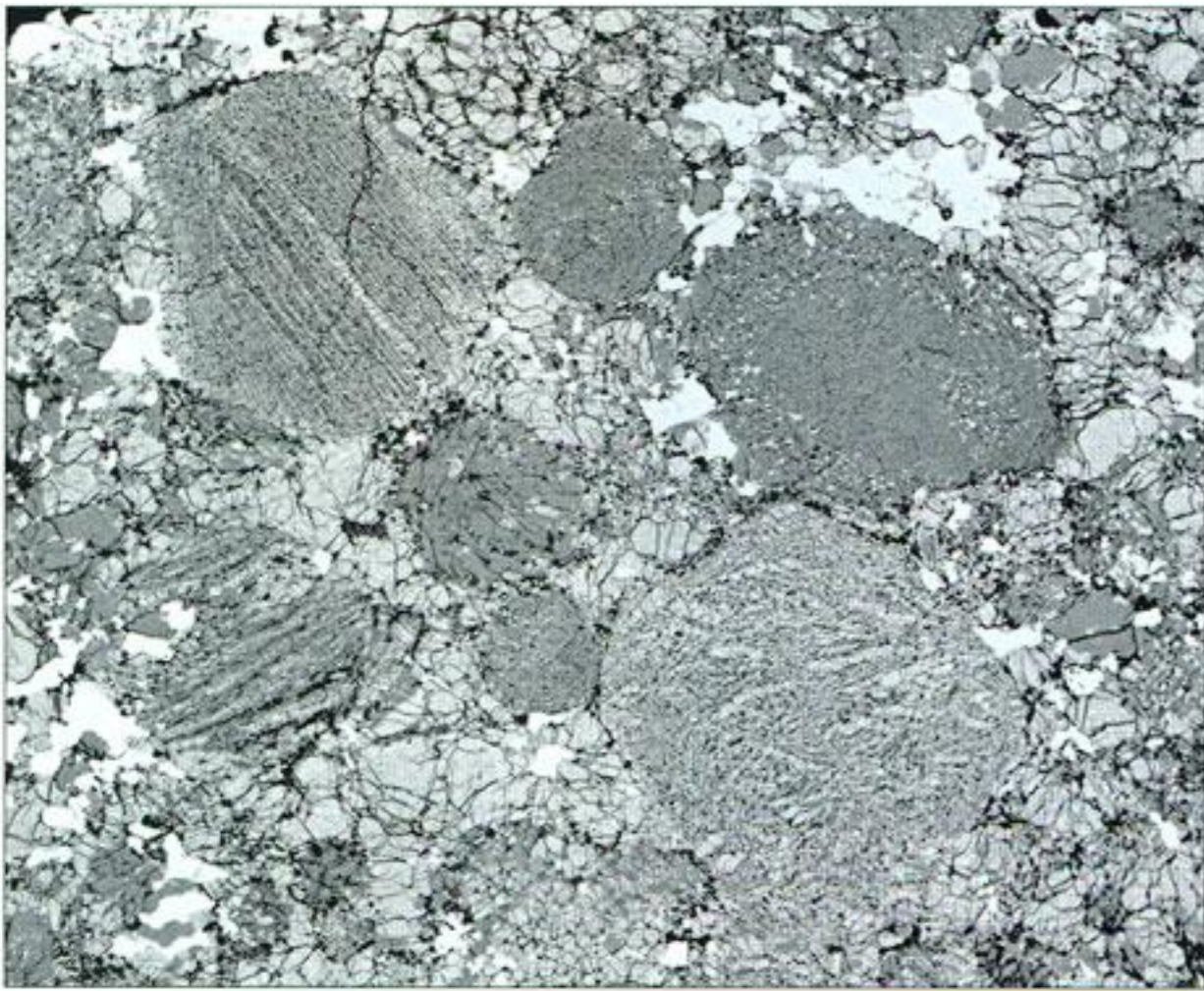
Типы хондритов.

лов (оливина и пироксена), все меньше содержание углерода. Петрологический анализ Челябинского метеорита приводит к выводу, что он относится к пятому петрологическому типу.

Еще один параметр, которым принято характеризовать метеориты этого типа, — это ударная классификация. По нему их подразделяют на шесть групп: от S1 — не несущих следов ударной нагрузки — до S5, S6 — высокоударных, содержащих ударное стекло, характеризующихся развитым мозаицизмом, появлением высокобарных минералов (рингвудита).

В этом ряду, согласно оценке нашего опытного петролога Михаила Назарова, Челябинский метеорит должен быть отнесен к группе S4 — умеренного ударного метеоризма, при котором вещество испытало ударные нагрузки порядка $25\text{--}35\text{ GPa}$.

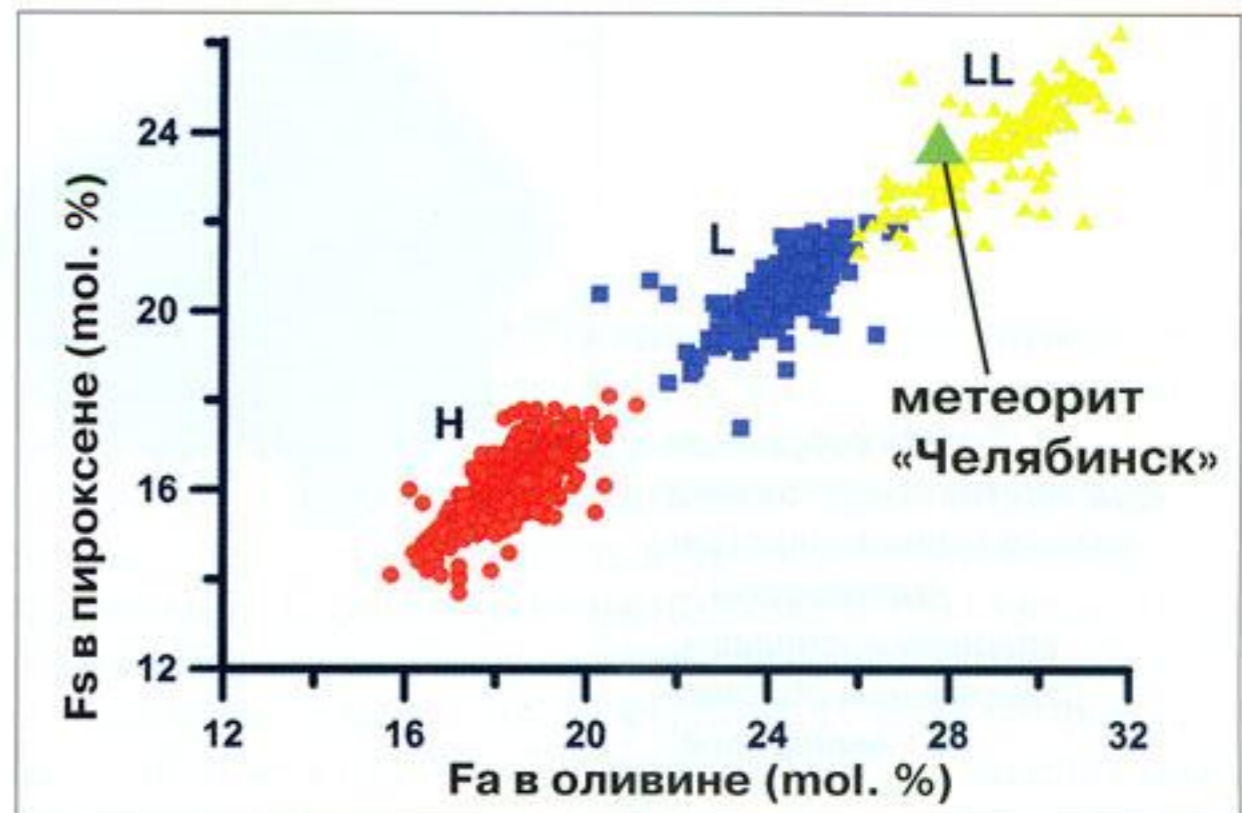
Наконец, метеорит оценивается еще по степени сохранности после выпадения. Вообще все они делятся на падения (falls) и находки (finds). Первые из них — это те, чье падение наблюдалось и они были вскоре после этого собраны. Находки — это те метеориты, которые были обнаружены случайно, иногда спустя много лет после их падения. Понятно, что тогда они претерпели изменения в условиях Земли, влияние атмосферы, воды, часто микроорганизмов, т.е. испытали в той или иной степени выветривание (weathering). И конечно, наиболее ценные те из них, которые были собраны немедленно после падения. К таковым и относится Челябинский метеорит: степень его выветривания равна нулю (W0).



Хондры (микроскоп SX-100 «Сатеса»).



По составам оливина и пироксена метеорит «Челябинск» относится к группе LL хондритов.



Таким образом, итоговая идентификация Челябинского метеорита представлена формулой обыкновенный хондрит: LL5/S4-WO.

Эта идентификация вместе с названием «Челябинск» представлена в Номенклатурный комитет Международного метеоритного общества.

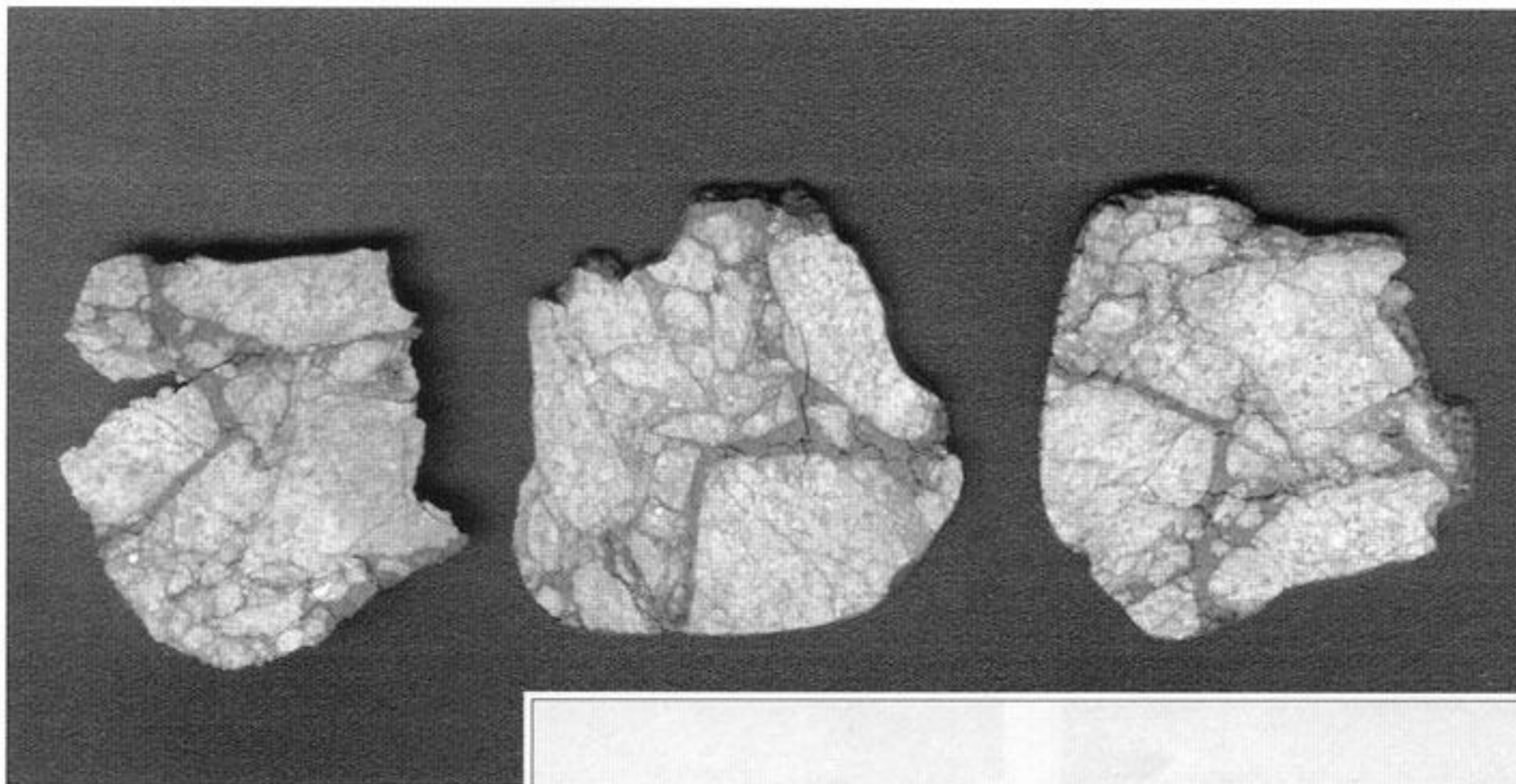
Но это не исчерпывает того интереса, который представляет данное событие. В составе этого метеорита были обнаружены две фазы. Первая — светлая, представляет, по-видимому, основную его часть. В ней вместе с сохранившимися хондрами присутствуют многочисленные следы дробления, трещины, жилки, заполненные застывшим расплавом. Вторая фаза — темная, микрозернистая, представляет собой результат ударного плавления.

Анализ содержания (в таблице представлена для примера лишь малая часть полученных данных) разных по геохимическому поведению элементов (литофильных, сидерофильных, халькофильных) показывает, что по составу обе фазы практически идентичны и совпадают с составом, типичным для метеоритов LL-типа. Из этого следует, что темный расплав — это не продукт магматизма и дифференциации, а действительно ударный расплав.

Таблица

Сравнительное содержание некоторых элементов в разных фазах метеорита «Челябинск» и в хондритах LL-типа (мкг/г)

| Элемент | Светлая фаза | Темная фаза | Характерно для LL |
|---------|--------------|-------------|-------------------|
| Li | 2,0 | 2,0 | 2,1 |
| Be | 0,035 | 0,036 | 0,051 |
| V | 68,7 | 66,6 | 75 |
| Rb | 3,7 | 3,4 | 3,1 |
| Zr | 6,9 | 8,6 | 5,9 |
| La | 0,38 | 0,34 | 0,315 |
| Ce | 0,95 | 0,46 | 0,907 |
| Sm | 0,22 | 0,24 | 0,200 |
| Lu | 0,039 | 0,038 | 0,033 |
| Th | 0,053 | 0,052 | 0,043 |
| U | 0,022 | 0,020 | 0,013 |
| Co | 643 | 584 | 490 |
| Ni | 10854 | 121215 | 10200 |
| Cu | 83,1 | 95,7 | 80 |
| Ga | 4,6 | 4,5 | 5,0 |
| Ir | 0,46 | 0,45 | 0,360 |
| Pt | 2,2 | 1,6 | 0,85 |
| Au | 0,21 | 0,13 | 0,14 |



2/3 фрагментов состоят из светлого материала, в котором развиты трещины, заполненные темным ударным расплавом.



1/3 часть собранных фрагментов представлена темным мелкозернистым материалом — ударным расплавом, содержащим обломки минералов.

Помимо химико-петрологического анализа был выполнен изотопный анализ углерода и произведено исследование геохронологических систем Rb/Sr и Sm/Nd.

Содержание ($c=0,02\%$) и изотопный состав углерода, измеренные на масс-спектрометре Delta-Plus в лаборатории геохимии углерода, оказались в пределах диапазона, характерного для обыкновенных хондритов, с несколько различными значениями $\delta^{13}\text{C}$ для светлой ($\delta^{13}\text{C}$ от $-21,5$ до $-25,2\%$) и темной ($\delta^{13}\text{C}$ от $-25,3$ до $-28,5\%$) фаз, что, впрочем, следовало ожидать.

Исследование Sm/Nd и Rb/Sr систем, произведенное Юрием Костицыным, показало: метеорит претерпел в своей истории чувствительные ударные события. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — Sm/Nd изохронна, указывает на возраст ударного события, имевшего место ~ 300 млн лет назад. Вероятно, с этим событием связано появление обширных ударных расплавов (темной фазы) в метеорите.

Rb/Sr система метеорита нарушена. Это позволяет предположить: в последующей космической истории метеорита было, по крайней мере, еще одно ударное событие, менее разрушительное. Оно привело к тому,

что более чувствительная система $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ — Rb/Sr была нарушена, а более устойчивая Sm/Nd система сохранилась.

Возможно, с этим последним ударным событием связана наблюдаемая высокая трещиноватость данного метеорита. При вхождении в атмосферу это привело к тому, что метеоритное тело фрагментировало. При этом поверхность соприкосновения вещества с атмосферой многократно увеличилась, что привело к резкому энерговыделению, наблюдаемому как взрыв и сопровождавшемуся яркой вспышкой и развитием ударной волны.

По имеющимся к настоящему времени данным реконструкции орбиты Челябинского метеорита он, вероятно, относится к тем 5–6 тысячам небесных тел, выделяемых как группа AAA (Аполлоны, Амуры, Атоны), эллиптическая орбита которых заходит внутрь орбиты Земли и, соответственно, вероятность столкновения их с Землей повышена.

Иллюстрации предоставлены автором