

# МЕТЕОРИТИКА, МЕТЕОРИТЫ И ПРИСУТСТВУЮЩИЕ В НИХ МИНЕРАЛЫ

А. А. УЛЬЯНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## METEORITICS, METEORITES AND CONSTITUTIVE MINERALS

A. A. ULYANOV

*Several basic problems in modern meteorite science are reviewed. Mineralogical, chemical and isotopic data suggest that some types of meteorites contain both minerals formed at the preplanetary stage of Solar system evolution, and extrasolar minerals brought into protosolar nebula from other star systems and interstellar medium.*

*Рассмотрены направления в изучении метеоритов, получившие развитие за последние годы. Данные по минеральному, химическому и изотопному составам свидетельствуют, что в некоторых типах метеоритов есть минералы, образовавшиеся на допланетной стадии развития Солнечной системы, и внесолнечные минералы, привнесенные в протосолнечную туманность из иных звездных систем и межзвездной среды.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ЧТО ТАКОЕ МЕТЕОРИТЫ

Если обратиться к “Советскому энциклопедическому словарю” (М.: Сов. энциклопедия, 1990. С. 807), то метеориты – это “малые тела Солнечной системы, попадающие на Землю из межпланетного пространства”. Однако в том же словаре под термином “малые тела Солнечной системы” подразумеваются “спутники планет, малые планеты, кометы и метеорное вещество” (Там же. С. 763). Давайте проанализируем приведенное выше энциклопедическое определение метеоритов.

Итак, **спутники планет**. Поступают ли с них на Землю метеориты? Да, но это далеко не самый главный источник. В настоящее время мировая коллекция превысила 10 тыс. индивидуальных метеоритов. И среди этих тысяч всего лишь 11 метеоритов (~0,1%) были отождествлены с лунными горными породами, то есть образовавшимися на спутнике.

**Малые планеты (астероиды)**. По современным представлениям, большая часть метеоритов приходит на Землю из пояса астероидов. И хотя это заключение базируется всего лишь на точных вычислениях орбит пяти метеоритов, движение которых в атмосфере нашей планеты были сфотографированы или даже записаны как видеополоски, есть еще много и других косвенных свидетельств того, что пояс астероидов – источник метеоритов. Однако вещество, которое слагает наиболее распространенный тип каменных метеоритов, до последнего времени так и не удавалось идентифицировать в составе поверхностного слоя астероидов (а их было изучено несколько сот). Первое сообщение об обнаружении астероида, состав которого отвечает наиболее распространенному типу каменных метеоритов, датируется 1993 годом. Различия в составах наиболее распространенного типа астероидов и наиболее распространенного типа каменных метеоритов, падения которых были зарегистрированы (то есть подтверждены документально), – серьезный аргумент против идеи астероидного происхождения всех метеоритов. Тем не менее определенные типы метеоритного вещества явно представляют собой обломки

некогда существовавших астероидов, и, наверное, трудно найти исследователей, которые смогли бы аргументированно опровергнуть этот тезис.

**Кометы.** Специфический состав комет (более чем тысячекратное обогащение их летучими соединениями по сравнению с обычным космическим веществом, выпадающим на Землю) не позволяет отождествить кометы и метеориты. Это принципиально различные типы вещества в Космосе.

**Метеорное вещество конечно связано с метеоритами.** Однако под метеорами мы подразумеваем явление полного сгорания космического вещества в атмосфере Земли за счет аэродинамического трения.

Итак, мы рассмотрели все четыре позиции в определении малых тел Солнечной системы, и, вероятно, у читателя уже сформировалось свое понимание о том, какая же существует связь между ними и метеоритами. Следует добавить, что источниками метеоритов являются и планеты земной группы. Прошло уже более 15 лет, как были идентифицированы метеориты с Марса, а эту планету никак нельзя отнести к малым телам Солнечной системы.

Из сказанного становится очевидно, что метеориты довольно разнообразны по своему генезису. Объединяющим звеном для всех метеоритов является то, что на каком-то этапе эволюции Солнечной системы они оказались путешественниками в свободном космическом пространстве, двигающимися вокруг Солнца. При таком движении неизбежны столкновения, приводящие как к дроблению, так и к объединению сталкивающихся тел. Иногда происходили столкновения и с большими планетами. На этом космическая жизнь метеоритов заканчивалась. Объединение сантиметровых по размеру тел привело к тому, что многие из известных ныне метеоритов полигенны, то есть в пределах одного образца можно обнаружить обломки или включения, возникшие в результате принципиально разных процессов, протекавших на различных родительских телах и в разное время.

Вернемся к энциклопедическому определению понятия “метеорит”, а именно к тезису о выпадении метеоритов на Землю. Почему именно на Землю, а не на другие планеты и их спутники. Известны же находки привнесенного космического вещества в составе лунного грунта. Более того, на многих планетах Солнечной системы или их спутниках установлены так называемые метеоритные кратеры, причем многочисленные — результат высокоскоростного столкновения двух космических тел, как правило различающихся начальными массами. Это означает, что выпадение космического вещества происходит и на поверхности других планетарных тел, не только Земли.

В настоящий момент практически ни у кого не вызывает сомнений, что метеориты выпадали на земную поверхность в течение всего геологического времени. Так, например, в плиоценовых (1,6–5,3 млн лет назад) отложениях Канады был найден первый, а впоследствии и второй экземпляры железного метеорита Klon-dike. Сильно выветрелый железный метеорит Sardis упал в среднемиоценовое (11,2–16,6 млн лет) море и был захоронен в отложениях хауторнской свиты. Один из железных метеоритов был обнаружен в эоценовых (36,6–57,8 млн лет) породах при проведении буровых работ на нефть в штате Техас (США). В последнее время стали известны находки ископаемых метеоритов в пограничных мел-палеогеновых (66,4 млн лет) отложениях Северной Атлантики и ордовикских (438–505 млн лет) отложениях Брунфло (Швеция). Если учесть редкость метеоритов вообще и их плохую сохранность в древних породах, то находки ископаемых метеоритов представляются и не такими уж редкими.

Размеры метеоритов колеблются от мельчайших пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике. Из всех до сих пор найденных одиночных метеоритов самым крупным является железный метеорит Ноба в Юго-Западной Африке. Его масса составляет около 60 т. Первоначально масса была, вероятно, значительно больше, поскольку метеорит окружен слоем лимонита ( $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ) толщиной до 0,5 м, образовавшегося в результате длительного земного выветривания.

## КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА (МЕТЕОРИТИКА ДО XX ВЕКА)

История исследования метеоритов насчитывает чуть больше двух столетий, хотя человечество познакомилось с этими небесными посланниками существенно раньше. Первое железо, использованное человеком, несомненно, было метеоритным. Это нашло свое отражение в названии железа у многих народов. Так, древние египтяне именовали его “бинипет”, что означает небесная руда. В древней Месопотамии его называли “анбар” — небесный металл; древнегреческое “сидерос” происходит от латинского слова “sidereus” — звездный. Древнеармянское название железа “еркам” — капнувший (упавший) с неба.

Первое задокументированное сведение о камнях, падающих с неба, встречено в китайских летописях и датируется 654 годом до н.э. Наиболее древний метеорит, наблюдавшийся при падении и сохранившийся до наших дней, — это каменный метеорит Nogato, падение которого, как задокументировано в старых японских летописях, наблюдалось 19 мая 861 г. н.э.

Шли века, метеориты падали на Землю, летописные данные меняли свою религиозную форму на все

более правдоподобное описание падений. Тем не менее к концу XVIII века большинство европейских ученых все же крайне скептически относились к сообщениям простого люда о камнях, падающих с неба. В 1772 году известный химик А.Л. Лавуазье стал одним из авторов доклада ученых в Парижскую академию наук, в котором говорилось, что “падения камней с неба физически невозможны”. После такого заключения, подписанного авторитетными учеными, Парижская академия наук отказалась рассматривать какие-либо сообщения “о камнях, падающих с неба”. Столь беспепелляционное отрицание возможности падения на Землю тел из космического пространства привело к тому, что, когда утром 24 июня 1790 года на юге Франции упал метеорит Varbotan и падение его было засвидетельствовано бургомистром и городской ратушей, французский ученый П. Бертолле (1741–1799) писал: “Как печально, что целый муниципалитет заносит в протокол народные сказки, выдавая их за действительно виденное, тогда как не только физикой, но и ничем разумным вообще их нельзя объяснить”. Увы, подобные высказывания не были единичными. И это в той самой Франции, где 7 марта 1618 года упавший на здание Парижского суда небольшой аэролит сжег его. В 1647 году болид раздавил двух яичников на Сене. В 1654 году метеорит убил монаха в окрестностях Парижа.

Однако следует отметить, что не все ученые единогласно разделяли официальную точку зрения Парижской академии и в историю метеоритики навсегда вошли имена Эрнста Хладного и Эдварда Кинга, опубликовавших в конце XVIII века первые книги по метеоритике на немецком и английском языках.

Первый “светлый луч в темном царстве” блеснул 26 апреля 1803 года: около городка Легль на севере Франции выпал каменный метеоритный дождь, после которого было собрано несколько тысяч камней. Падение метеорита было документально засвидетельствовано многими официальными лицами. Теперь уже даже Парижская академия наук не могла отрицать сам факт падения метеоритов с неба. После доклада академика Био об обстоятельствах падения Легльского метеоритного дождя близ городка Легль Парижская академия наук вынуждена была признать: метеориты существуют, метеориты – тела внеземного происхождения, метеориты действительно попадают на Землю из межпланетного пространства.

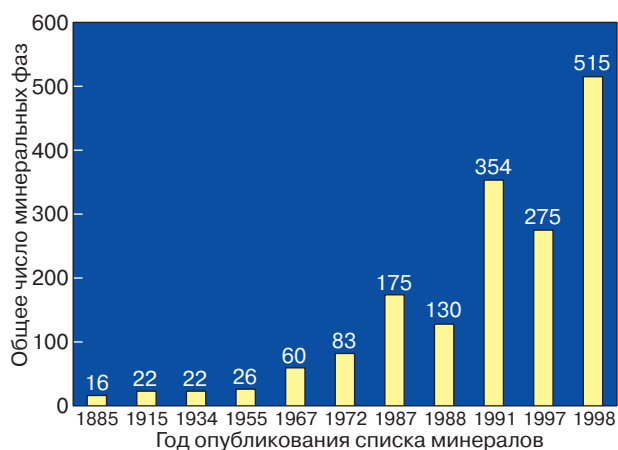
Такое официальное признание метеоритов явилось импульсом для их детального изучения, и благодаря усилиям многих исследователей метеоритика постепенно становится наукой, изучающей минеральный и химический состав космического вещества. Основными достижениями метеоритики XIX века можно признать следующие: 1) установление самого факта суще-

ствования метеоритов, 2) отождествление разных типов метеоритов с отдельными оболочками планет и 3) гипотезу об астероидальном происхождении метеоритов.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕТЕОРИТАХ (МЕТЕОРИТИКА XX ВЕКА)

На рубеже XIX–XX веков исследователи окончательно утвердились во мнении, что одним из ключевых моментов в построении непротиворечивого сценария образования Солнечной системы могут стать те самые “камни, падающие с неба”, которые столетием раньше были преданы анафеме и безжалостно выбрасывались на помойки подобно тому, как во времена инквизиции (да и не только инквизиции) сжигались книги.

Итак, в начале XX века метеоритика праздновала свою победу. Она была чуть ли не единственной наукой, объект исследования которой мог помочь разобраться в сложных процессах образования и последующей эволюции минерального вещества в Солнечной системе. Детальное изучение минералогического и химического составов различных метеоритов, выполненное во второй половине XX века, позволило серьезно пересмотреть и усовершенствовать первые классификационные схемы метеоритов и представления наших предшественников о генезисе самих метеоритов. Повышение интереса ученых к исследованию метеоритов и детальность подхода проводимых ими исследований наглядно демонстрирует диаграмма увеличения числа минералов, установленных во внеземном веществе на протяжении последних 100 лет (рис. 1).



**Рис. 1.** Число известных минеральных фаз (и их разновидностей) во внеземном веществе. Данные заимствованы из работ: Tschermak (1885), Farrington (1915), Heide (1934), Кринов (1955), Mason (1967), Mason (1972), Юдин, Коломенский (1987), Kerridge, Matthews (1988)

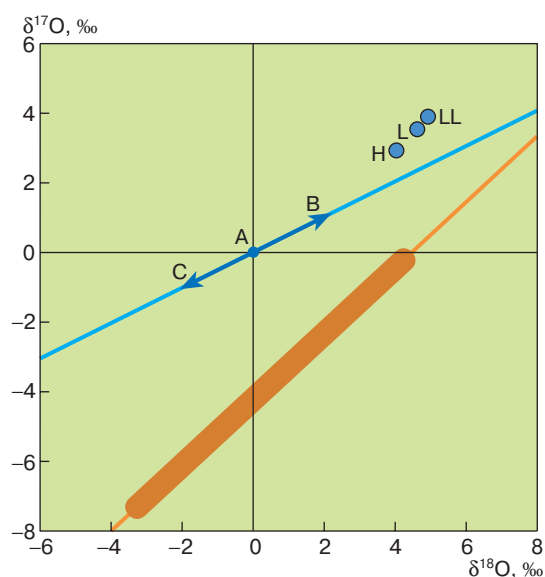
В результате многочисленных исследований выяснилось, что далеко не все метеориты — производные процесса дифференциации вещества на планетарных телах. Многие представляют собой брекчии, отдельные обломки которых не могли образоваться в пределах единого родительского тела. Например, хорошо известный метеорит Kaidun содержит в своем составе обломки разных типов метеоритов, образование которых протекало при существенно различающихся окислительно-восстановительных условиях.

В метеорите Adzi-Bogdo установлено одновременное присутствие ультраосновных и кислых (по составу) ксенолитов. Находка последних говорит о крайне высокой степени дифференциации вещества на родительских телах, а значит, и об их относительно больших размерах.

Наиболее убедительные доказательства гетерогенности брекчированных метеоритов получены на основании изотопных данных, в частности об изотопном составе кислорода. Постараемся несколько пояснить этот тезис.

Известны три стабильных изотопа кислорода:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  и  $^{17}\text{O}$ . В результате протекания каких-либо физических, физико-химических или химических процессов практически всегда в продуктах реакций можно зафиксировать фракционирование изотопов кислорода. Например, при кристаллизации какого-либо минерала из силикатного расплава изотопный состав кислорода в этом минерале будет отличаться от исходного и оставшегося расплава, причем комплементарность не должна быть нарушена.

Поскольку различия в поведении изотопов в разнообразных физико-химических процессах связаны не с проявлением их химических свойств (которые практически одинаковы), а именно с массой изотопов, то характер фракционирования или разделения изотопов определяется как раз этим свойством. Поэтому на изотопно-кислородной диаграмме составы практически всех земных горных пород и минералов располагаются вдоль единой линии с тангенсом угла наклона  $\sim 0,5$  (рис. 2), получившей название “линии земного масс-фракционирования” (замысловатые “дельта” на диаграмме в первом приближении можно рассматривать в качестве величин, пропорциональных содержанию того или иного изотопа). Если, например, первичный расплав отвечал составу А, то при кристаллизации из него какой-либо минеральной фазы состав последней будет сдвинут по линии масс-фракционирования в точку В, а оставшийся расплав обязан отвечать составу точки С (в этом и состоит правило комплементарности). Самое главное следствие из подобного анализа состоит в том, что любой химический процесс не может сдвинуть точку продуктов реакции с линии масс-фрак-



**Рис. 2.** Изотопная диаграмма для кислорода. Линия земного масс-фракционирования (верхняя) проходит под углом  $30^\circ$ . Выше нее располагаются поля H-, L- и LL-хондритов. Тугоплавкие включения располагаются в нижней выделенной области и следуют тренду с углом наклона  $45^\circ$

ционирования вверх или вниз. Какие бы химические реакции ни осуществлялись, какие бы минеральные фазы ни образовывались, всегда их составы будут находиться на линии масс-фракционирования. Это было неоднократно показано на примере земных минералов, руд и горных пород.

На этой же изотопной диаграмме четко прослеживается другая прямая линия (тренд) с тангенсом угла наклона  $\sim 1$ . Ее образуют так называемые тугоплавкие или белые включения, установленные в одном из редких типов каменных метеоритов. Этот тренд известен уже почти четверть века, но и по сей день остается предметом многочисленных дискуссий. До сих пор нет общепринятого объяснения столь необычному поведению изотопного состава кислорода в этих экзотических объектах. Первоначально высказывалась точка зрения, что обогащение изотопом  $^{16}\text{O}$  произошло за счет привноса вещества, синтезированного в одной из внутренних оболочек сверхновой звезды. Однако последующие исследования не подтвердили (но до конца и не опровергли) предложенной гипотезы. Эти кислородно-аномальные объекты явились предметом детального исследования многих научных групп; были изучены минеральный, химический и изотопные составы, однако непротиворечивого механизма их генезиса так и не было предложено. В начале 70-х годов популярной стала гипотеза конденсационного происхождения тугоплав-



ких включений. Эта точка зрения базировалась на том, что фазовый состав, предсказанный на основании термодинамических расчетов последовательности конденсации высокотемпературного газа “солнечного” состава в равновесных условиях, практически полностью совпадал с наблюдаемым минеральным составом в тугоплавких включениях. Шло время, накапливались аналитические данные, и сейчас очевидно, что такие включения являются многостадийными образованиями, запечатлевшими в себе не только стадию конденсации, но и многие другие. Тем не менее конденсационная гипотеза, разработанная Лордом, Ларимером и Гроссманом, сыграла большую роль в понимании процессов минералообразования, протекавших на допланетной стадии развития Солнечной системы.

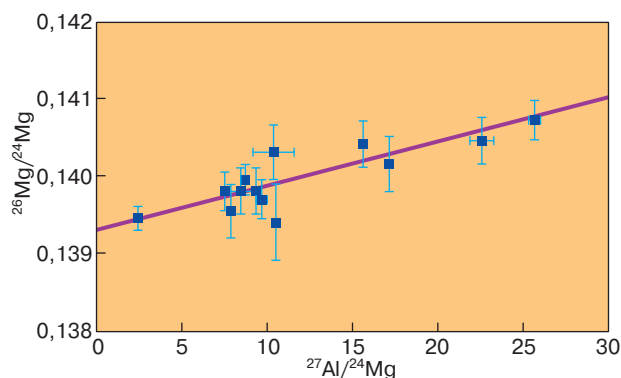
Вернемся к наиболее распространенному типу каменных метеоритов и рассматриваемой нами изотопно-кислородной диаграмме. Различные представители этого типа метеоритов занимают на диаграмме области, не связанные между собой законом масс-фракционирования. Несмотря на петрологическую или геохимическую стройность гипотез, например об образовании различных представителей этого типа каменных метеоритов — обогащенных металлом (H), обедненных металлом (L) и очень обедненных металлом (LL) — в пределах одного (единого) родительского тела, изотопные данные свидетельствуют против подобного заключения: никакими процессами магматической дифференциации мы не в силах объяснить наблюдаемые различия изотопного состава кислорода. Поэтому необходимо допустить существование нескольких родительских тел даже для наиболее распространенного типа каменных метеоритов.

Изучая разные составляющие хондритовых метеоритов, мы приходим к заключению и о временной последовательности их образования. Подобные выводы также базируются в основном на данных изотопных исследований. Исторически первой изотопной системой, предложенной для этих целей, была система I—Xe. Изотоп  $^{129}\text{I}$  (период полураспада которого составляет 17 млн лет) распадается с образованием  $^{129}\text{Xe}$ . Значит, при определенных допущениях, фиксируя избыток  $^{129}\text{Xe}$  по отношению к другим стабильным изотопам этого элемента, можно определить интервал времени между последним событием нуклеосинтеза, приведшим к образованию  $^{129}\text{I}$  (обычно это связывают со взрывом сверхновой звезды в окрестностях протосолнечной туманности), и началом конденсации первого твердого вещества в нашей Солнечной системе.

Рассмотрим эту временную датировку на примере другой изотопной системы — Al—Mg. Изотоп  $^{26}\text{Al}$  (период полураспада 0,72 млн лет) распадается с образованием стабильного изотопа  $^{26}\text{Mg}$ . Если образование ми-

нерального вещества в Солнечной системе отстояло от момента завершения звездного нуклеосинтеза элементов (в частности, изотопа  $^{26}\text{Al}$ ) на время, незначительно превышающее период его полураспада, то образовавшиеся и лишённые Mg высокоглиноземистые фазы, в состав которых естественно должен был войти  $^{26}\text{Al}$  (например, анортит  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), сейчас должны характеризоваться избытком  $^{26}\text{Mg}$  по отношению к другому изотопу магния —  $^{24}\text{Mg}$  (если эти минералы не подверглись изменениям после их образования). Более того, для одновременно образовавшихся минеральных фаз должна наблюдаться положительная корреляция между содержаниями избыточного  $^{26}\text{Mg}$  и Al. Подобная корреляция существует (рис. 3). Таким образом, интервал времени между событием нуклеосинтеза, приведшим к образованию  $^{26}\text{Al}$ , и образованием минерального вещества в нашей Солнечной системе составил не более чем несколько миллионов лет. Анализируя данные по нахождению других короткоживущих нуклидов в веществе ранней Солнечной системы, можно заключить, что начальные этапы эволюции протопланетного облака сопровождались периодическими вспышками сверхновых звезд в его окрестностях и привнесом синтезированного этими звездами вещества.

Какие минералы были первыми конденсатами, первым твердым веществом, образовавшимся в нашей Солнечной системе? Этот вопрос остается до конца нерешенным. Однако данные по изучению химического состава весьма специфических образований (фремлинов) — определенного типа металлических выделений в некоторых тугоплавких включениях показывают, что наиболее вероятными кандидатами в первое твердое минеральное вещество, образованное (а не привнесенное) в нашей Солнечной системе, могут быть сплавы на основе элементов платиновой группы, железа и ни-



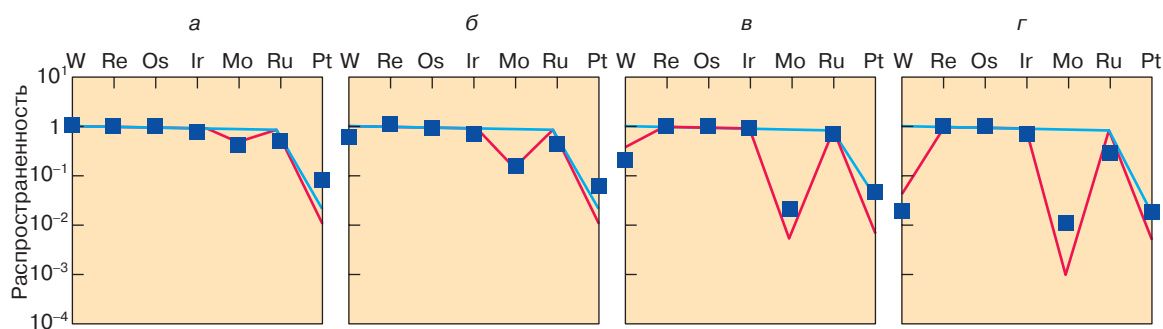
**Рис. 3.** Пример Mg–Al изотопной эволюционной диаграммы для одного из тугоплавких включений хондрита Ефремовка

кея. Результаты термодинамических расчетов состава и последовательности конденсации металлических фаз из высокотемпературного газового облака практически полностью соответствуют наблюдениям (рис. 4).

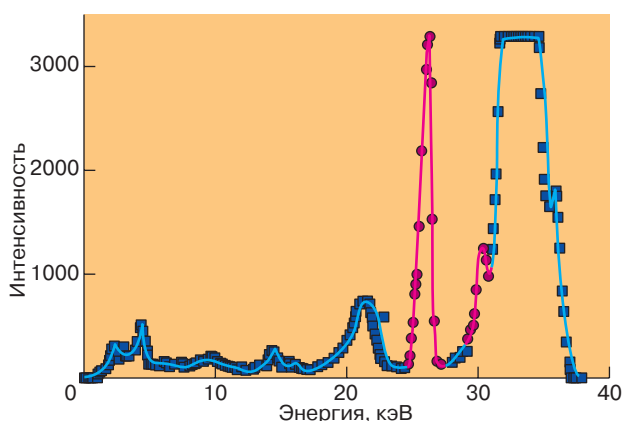
Последнее десятилетие развития метеоритики проходит под флагом поиска и изучения так называемых внесолнечных и межзвездных минеральных зерен. Их открытие было связано с детальным изучением изотопного состава многих элементов в кислотно-нерастворимых остатках метеоритов, то есть наиболее трудно разлагаемых в сильных кислотах минералов, таких, как алмаз, лонсдейлит (одна из полиморфных модификаций углерода), карбид кремния, нитрид кремния. Несмотря на малый размер таких минеральных фаз (обычно менее 1 мкм), сейчас появились локальные методы их диагностики и изучения химического и изотопного составов. Эти минеральные фазы обладают столь аномальным изотопным составом, что объяснить их происхождение в рамках Солнечной системы невозможно. Практически весь окружающий нас минеральный мир — земные и лунные горные породы, планеты, метеориты, астероиды, кометы, космическая пыль — это порождение нашей Солнечной системы. А здесь мы сталкиваемся с минеральной материей, порожденной другими звездами. Эти минералы образовались во внешних оболочках далеких звезд и в межзвездной среде и унаследовали их изотопный состав. С момента образования из-за своей химической инертности и тугоплавкости они не испытали действия каких-либо дальнейших процессов изменения и преобразования вещества. Мы впервые получили возможность изучать в лабораториях вещество, синтезированное в определенных типах звезд, и здесь дороги ядерной физики, астрофизики и метеоритики пересеклись. Метеориты оказались чуть ли не единственным материальным объектом,

способным помочь разобраться в сложных вопросах глобальной эволюции вещества в Космосе.

Дальнейшее изучение минерального вещества, сконденсированного в определенных оболочках развивающихся звезд, вероятно, принесет свои плоды и в области исследования нуклеосинтеза элементов. Последняя проблема, как это ни парадоксально, опять тесно связана с метеоритным веществом. Современные модели звездного нуклеосинтеза допускают возможность образования сверхтяжелых элементов (СТЭ), принадлежащих так называемому острову стабильности, то есть элементов существенно тяжелее урана и тория, но с соизмеримыми с ними периодами полураспада. Теоретические оценки периодов полураспада сверхтяжелых ядер по данным разных авторов существенно различаются (до шести порядков). Если основываться на нижней границе величины периода полураспада  $\tau_{1/2}$  ( $10^3$  лет), то вероятность обнаружения СТЭ в природных объектах близка к нулю. Однако шансы мгновенно повышаются, если мы принимаем верхнюю оценку  $\tau_{1/2}$  ( $10^9$  лет). Последнее обстоятельство и послужило своеобразным импульсом для многочисленных поисков СТЭ в самых разнообразных природных объектах, в том числе и в метеоритах. Значительный вклад в решение этой проблемы внесли работы, выполненные под руководством Ю.А. Шуколюкова в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, а также ученых из Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Установление в углистых хондритах ксенона, обогащенного тяжелыми изотопами ( $^{131}\text{Xe} - ^{136}\text{Xe}$ ), первоначально (и ошибочно) связывалось с делением СТЭ из “острова стабильности”. Г.Н. Флеров с соавторами провели поиск спонтанно делящегося СТЭ в метеоритах Саратов, Ефремовка и Allende и сообщили о наблюдении событий множественной эмиссии ней-



**Рис. 4.** Содержания элементов платиновой группы, вольфрама и молибдена в микровыделениях металла одного из тугоплавких включений метеорита Ефремовка (синие квадраты). Голубая линия – рассчитанные значения концентрации элементов для солнечного отношения  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ ; красная линия – рассчитанные значения (Figley, Palme, 1985) для  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  (а),  $10^{-2}$  (б),  $5 \cdot 10^{-2}$  (в) и  $10^{-1}$  (г). По вертикальной оси отложены нормированные значения концентрации элементов. Порядок расположения элементов по горизонтальной оси отвечает последовательности в увеличении их летучести



**Рис. 5.** Пример рентгеновского спектра лунной фракции вещества одного темного включения из метеорита Ефремовка. Спектр получен на станции элементного анализа ВЭПП-4, ИЯФ СО РАН (Новосибирск). На фоне разнообразных аппаратурных пиков и характеристических пиков элементов, присутствующих в анализируемом материале (показаны синим цветом), отчетливо выделяются пики (красные), энергии которых соответствуют излучаемым квантам при переходе электронов с уровней М на уровни L в атомах сверхтяжелых элементов

тронов, скорость счета которых существенно превышала уровень фона. Авторы предположили, что эффект эмиссии связан со спонтанным делением ранее неизвестного в природе нуклида с атомным номером в таблице Менделеева между 108 и 116. В случае метеорита Allende они оценили концентрацию СТЭ в  $10^{-12}$  мас. %. Однако попытки выделения СТЭ методом химического концентрирования не привели к положительным результатам. Тем не менее данные группы Флерова были тщательно проверены и в пределах ошибки измерений подтверждены. Еще один серьезный довод в пользу присутствия ядер СТЭ, теперь уже в космических лучах, был приведен в работах В.П. Перелыгина с соавторами. Ими зафиксированы следы присутствия СТЭ с атомным номером  $\geq 110$  в оливинах из палласитов (железокаменных метеоритов).

Одним из предсказанных свойств стабильных СТЭ является их высокая летучесть, столь высокая, что высказывалось мнение о возможном жидком или даже газообразном состоянии таких трансурановых элементов при нормальных условиях. В некоторых типах метеоритного вещества были описаны так называемые темные включения, резко обогащенные летучими элементами:

Tl, Bi, Pb. Именно поэтому темные включения наиболее перспективны для поиска СТЭ (отметим, что они присутствуют и в метеорите Allende, в котором группа Флерова установила неизвестный, спонтанно делящийся нуклид). Исследование летучей фракции темных включений метеорита Ефремовка методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) позволило установить в рентгеновском спектре интенсивные пики (рис. 5), которые соответствуют энергии квантов, связанных с переходами электронов с уровня М на уровень L в атомах сверхтяжелых элементов. Что это — случайность? На этот вопрос еще предстоит дать ответ. Однако уже полученные данные свидетельствуют о возможности обнаружения СТЭ в космическом веществе.

В заключение хотелось бы отметить, что на многие вопросы и по сей день мы не можем дать окончательные ответы или решения. Тем не менее нет никаких оснований сомневаться, что дальнейшее изучение метеоритов еще откроет много неизвестного о составе, структуре и эволюции вещества в Космосе.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Додд Р.Т. Метеориты: Петрология и геохимия: Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
2. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981.
3. Гроссман Л. Химическое фракционирование в протопланетном облаке // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 87–96.
4. Шуколюков Ю.А. Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М.: Энергоиздат, 1982.
5. Флеров Г.Н., Ильинов А.С. На пути к сверхэлементам. М.: Педагогика, 1982.

Рецензент статьи Д.Ю. Пушаровский

\*\*\*

Александр Анатольевич Ульянов, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии МГУ, член Комитета по метеоритам РАН. Область научных интересов — минералогия, метеоритика, изотопная космохимия. Автор более 150 научных публикаций.