

УДК 523.68

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ

© 2017 г. Е. Н. Слюта

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

e-mail: slyuta@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

После исправления 10.06.2016 г.

Рассматривается методика экспериментальных исследований физико-механических свойств каменных метеоритов. Приводятся экспериментальные данные по физико-механическим свойствам образцов трех обыкновенных хондритов. Показано, что обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной (пространственной) анизотропией физико-механических свойств, когда по одному из направлений предел прочности на сжатие значительно превышает значения по двум другим направлениям. Измеренный предел прочности на сжатие обыкновенных хондритов находится в интервале от 105 до 203 МПа, а предел прочности на растяжение – в интервале от 18 до 31 МПа. Сравнение с имеющимися опубликованными данными по прочности углистых хондритов показало, что они существенно отличаются от свойств обыкновенных хондритов. Показано, что наблюдаемые критические аэродинамические нагрузки не превышают измеренную в данной работе величину предела прочности на растяжение обыкновенных хондритов, которая фактически является верхним предельным значением, ограничивающим возможную максимальную аэродинамическую нагрузку для обыкновенных хондритов.

Ключевые слова: Каменные метеориты, обыкновенные хондриты, углистые хондриты, метеороид, болид, предел прочности, анизотропия физико-механических свойств, масштабный коэффициент, коэффициент дефектности

DOI: 10.7868/S0320930X17010054

ВВЕДЕНИЕ

Полет и разрушение крупного метеороида в верхних слоях атмосферы Земли сопровождается формированием ударной волны, распространение которой приводит к образованию нагретой излучающей области и генерации акустических и сейсмических волн. Свечение создается не самим твердым телом, а окружающей его газовой оболочкой. Аэродинамическая нагрузка приводит к разрушению и торможению метеороида и появлению максимумов светимости (вспышек) на световой кривой блеска.

Термические напряжения, возникающие при изменении температуры метеороидов в атмосфере Земли, из-за низкой теплопроводности каменных метеоритов затрагивают лишь поверхностный слой и приводят только к шелушению и абляции поверхности летящего метеороида (Медведев и др., 1985). Например, глубина прогрева каменного метеороида при скоростях 15–60 км с⁻¹ составляет 0.3–0.5 мм, а железного – 0.9–1.7 мм (Левин, 1956). Абляция (испарение, плавление и сдувание пленки расплава с поверхности) и образование на поверхности метеорита корки плавления затрагивают поверхностный слой каменного метеорита толщиной лишь в 1–2 мм. Внутри метеорита температура в течение

нескольких секунд торможения в верхней атмосфере Земли остается постоянной и практически не изменяется.

Метеороиды небольших размеров резко тормозятся и полностью испаряются уже в верхних слоях атмосферы. Крупные и плотные метеороиды проходят атмосферу практически без торможения и без существенного изменения формы (Svetsov и др., 1995) и могут достичь высоты, на которой давление газа в ударном слое (аэродинамическая нагрузка) становится сравнимым с величиной порядка прочности материала метеорита. Разрушение крупных метеороидов обычно происходит при нагрузках меньше измеренных прочностей образцов метеоритов похожего типа (Цветков, Скрипник, 1991; Serlecha, 1996; Popova и др., 2011). Было подмечено, что если дробление происходит в более плотных слоях атмосферы, т.е. при высокой аэродинамической нагрузке, то образуется много фрагментов при меньшем эллипсе рассеяния и, напротив, чем больше высота дробления, тем меньше фрагментов (и они крупнее) и, соответственно, больше эллипсоид рассеяния (Кринов, 1955).

Если процессы взаимодействия метеороида с атмосферой Земли относительно хорошо изуче-

ны, в том числе и аналитически (Левин, 1956; Бронштэн, 1981; Svetsov и др., 1995), то как проходит процесс дробления, т.е. собственно механизм разрушения метеороида, который тесно связан с физико-механическими свойствами материала метеороида, "...мы пока знаем плохо" (Бронштэн, 1981). Челябинское событие вновь напомнило о необходимости понимания этой проблемы. Физико-механические свойства каменных метеоритов, исследование которых и является основной задачей предлагаемой работы, являются необходимым и важным компонентом в изучении механизма разрушения крупных каменных метеороидов.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ

По упругим свойствам метеориты занимают промежуточное положение между земными и лунными горными породами (Горшков, 1973). Чем больше у каменных метеоритов диапазон пористости, тем больше интервал (разброс) скоростей упругих волн. Наблюдается линейная зависимость скорости поперечных волн (v_s) от плотности для различных классов метеоритов (Горшков, 1973). Модуль Юнга каменных метеоритов изменяется от 5.2 до 8.7×10^{10} Па, что соответствует упругости (деформационным характеристикам) земных основных горных пород (табл. 1). Модуль Юнга метеорита Царев также характеризуется повышенными значениями $(10.1-19.1) \times 10^{10}$ Па, и приближается к значениям земных перидотитов $((13.0-16.0) \times 10^{10}$ Па) и оливинитов $((11.7-17.5) \times 10^{10}$ Па) (Медведев и др., 1985). Экспериментальные значения модуля Юнга большинства хондритов, по сравнению с вычисленными для среднего минерального состава полиминерального агрегата с идеальными связями между зернами $((19-20) \times 10^{10}$ Па), примерно в полтора-два раза меньше. Как и в случае с теплофизическими свойствами, подобное существенное различие также указывает на несовершенство, т.е. примитивность структуры метеоритов (Медведев и др., 1985), которая, по сравнению с земными горными породами, обычно называется слабо уплотненной (loosely compacted). Более высокая чувствительность предела прочности на сжатие и разрушение в зависимости от скорости нагружения (скорости упругой деформации) также, по-видимому, объясняется менее совершенной и слабо уплотненной структурой по сравнению с земными горными породами (Kimberly, Ramesh, 2011). Измеренные значения коэффициента Пуассона для хондритов находятся в интервале 0.15–0.29, что соответствует диапазону значений для земных кристаллических горных пород (Медведев и др., 1985).

Как показывает зависимость предельных напряжений от размеров образцов на примере горной породы габбро (Зоткин и др., 1987), прочность образцов размером менее 15 мм и более 40 мм уменьшается. Например, предел прочности на сжатие в одинаковых образцах габбро с увеличением их размеров от 30 до 200 мм уменьшался от 270 до 145 МПа, т.е. больше чем в 1.5 раза (Медведев, 1983). Для небольших образцов, в данном случае размером менее 10–15 мм, это объясняется выходом на поверхность и влиянием отдельных неоднородностей, пор и дефектов на уровне границ отдельных минеральных зерен, сравнимых с размером образца (Nicolas, 1987). Требуемое минимальное соотношение между размером образца и размером минеральных зерен должно быть не менее 20–30 (Турчанинов и др., 1967).

Изменение величины в зависимости от размеров образца метеорита Царев наблюдается и для таких деформационных характеристик как модуль Юнга и коэффициент Пуассона (Зоткин и др., 1987). Подобная зависимость от размера образцов метеорита Царев наблюдается и для продольных и поперечных волн v_p и v_s .

Для образцов размером более 40 мм падение прочности объясняется увеличением количества и размера крупных дефектов и трещин с увеличением объема образца, т.е. так называемым "масштабным эффектом". Впервые аналитическая зависимость уменьшения прочности с увеличением объема для различных материалов на основе статистической теории была рассмотрена в работах (Weibull, 1939; 1951), а понятие прочности было представлено в виде случайной величины, заданной функцией распределения одного или нескольких параметров. Если перевести это математическое определение прочности на язык механики горных пород, то можно сказать, что нарушение сплошности начинается в наиболее слабом звене и не зависит от прочности других звеньев (Медведев, 1974а).

Влияние масштабного эффекта на предел прочности объекта определяется выражением (Svetsov и др., 1995)

$$\sigma = \sigma_s \left(\frac{m_s}{m} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где σ – предел прочности всего объекта, m – масса этого объекта, σ_s – экспериментальное значение предела прочности образца этого объекта, m_s – масса этого образца, α – масштабный коэффициент. Для крупных каменных объектов (метеороидов) коэффициент варьирует в крайне широких пределах – примерно от 0.1 до 0.7 (Ророва и др., 2011). Следует отметить, что крайне широкий разброс и зависимость от множества неопределенных факторов не позволяет использовать коэффициент в качестве универсального значения для

Таблица 1. Физико-механические и теплофизические характеристики каменных метеоритов и некоторых земных пород (Медведев и др., 1985)

Метеорит, образец, порода	Тип	Плотность, г см^{-3}	Скорость упругих волн, м с^{-1}		Коэфф. Пуассона	Модуль Юнга, 10^{10} Па	Прочность, МПа		Тепло- проводность, $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$	Температуро- проводность, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	Теплоемкость, $\text{кДж кг}^{-1} \text{К}$
			V_p	V_s			$\sigma_{\text{сomp}}$	$\sigma_{\text{тен}}$			
Крымка, 1705	LL3	3.25	4900	3140	0.15	7.8	160	22	2.32	1.05	0.68
Еленовка, 1831	L5	3.50	4320	2490	0.24	5.6	20	2	—	—	0.76*
Царев, 15380a	L5	3.52	6990	4300	0.19	15.8	222	26	3.68	1.13	0.92
Царев, 15384a	L5	3.55	7000	4350	0.19	16.1	—	—	3.71	1.20	0.87
Царев, 153846	L5	3.43	6970	3770	0.29	19.0	450	54	3.89	1.14	0.99
Царев, 15391	L5	3.24	6240	3430	0.28	10.1	157	16	2.76	1.17	0.73
Кунашак, 1723	L6	3.54	5440	3090	0.26	8.7	265	49	2.89	1.04	0.78
Кушшу, 2157	L6	3.90	3990	2290	0.26	5.2	98	11	2.30	1.04	0.57
Pultusk, 544	H5	3.56	5150	2860	0.27	7.6	213	31	3.05	1.03	0.83
Перидотиты*		2.85–2.90**	6200–6300	3300–3500	0.27–0.30	8.5–9.1	210–230	40–50	2.1	0.77	0.95

* Медведев, 1974б; ** Алексеева, 1958.

каменных тел и получения какой-либо дополнительной неизвестной информации об объекте (прочности, составе, размерах, дефектности и предыдущей столкновительной истории).

Масштабный эффект, связанный с зависимостью физико-механических свойств от размера образца, возможен только при одноосном сжатии или растяжении, т.е. преимущественно в лабораторных экспериментах при одноосном нагружении образцов. В геологических процессах, как правило, доминирует всесторонняя нагрузка (Турчанинов и др., 1967; Жарков, Трубицын, 1980), в том числе и в гравитационной деформации малых тел Солнечной системы (Slyuta, Voropaev, 1997).

Таким образом, оптимальный размер образцов тонко- и среднезернистых пород и каменных метеоритов, при котором механические свойства обусловлены только минеральным составом и структурой вещества и мало зависят от других факторов, находится в пределах от 10–15 до 40 мм. Структура определяет степень связи между минеральными зёрнами породы. Наибольшее влияние оказывает степень связи и сочетание главного, т.е. доминирующего минерала, и минерала, свойства которого значительно отличаются от главного (Ржевский, Новик, 1973). В силу избирательного характера разрушения твердых тел (нарушение сплошности начинается в наиболее слабом звене и не зависит от прочности других звеньев), наблюдаемые вариации прочностных свойств в образцах земных горных пород считаются допустимыми, если коэффициент вариации не превышает 30% (Породы горные, 1975). Опыт показывает, что существенные отклонения коэффициента вариации от допустимой величины, как правило, связаны либо с несоблюдением методики эксперимента и требований к подготовке образцов, либо с игнорированием таких дополнительных факторов, как например, учет ориентировки образцов при исследовании анизотропных пород. Учитывая вышерассмотренную специфику исследований физико-механических свойств горных пород, следует отметить, что при получении надежных данных по физико-механическим свойствам требуется достаточная статистика измерений. И напротив, сравнение с единичными измерениями может привести к серьезной ошибке, далекой от надежного результата.

Прочностные свойства метеоритов (предел прочности на сжатие σ_{com} и растяжение σ_{ten}), указанных в табл. 1, исследовались методом раскалывания клиньями пластин толщиной 10 мм с последующим раздавливанием образующихся кубиков (Медведев, 1974б; Медведев и др., 1985). Для трех образцов метеорита Царев данные по прочности различаются почти в три раза. Количество измерений и коэффициент вариации приведен лишь для образца № 153846, который для предела

прочности на сжатие и растяжение составляет 25% (14 измерений) и 21% (17 измерений) соответственно.

В работе (Зоткин и др., 1987) исследовались кубические образцы метеорита Царев различных размеров с длиной грани от 10 до 100 мм (табл. 2). Предел прочности на сжатие находится в диапазоне 256–499 МПа, а предел прочности на растяжение – 43–62 МПа. Обращают на себя внимание преимущественно очень низкий коэффициент вариации, иногда до первых процентов, что обычно нехарактерно для горных пород, а также высокие значения по прочности. Вероятно, это обусловлено предварительной и тщательной отбраковкой образцов по дефектности, что методически не совсем правильно и может давать искаженное представление о прочности данного метеорита в целом. Например, если отобрать образцы только с выраженным дефектом, то получим другие крайние значения. Также неизвестно, отбирались образцы из одного или из разных фрагментов метеорита. В целом распределение величины предела прочности на сжатие в зависимости от размеров образца достаточно хорошо согласуется с рассмотренным выше представлением об оптимальном размере образцов для исследования методом двухосного сжатия и растяжения (табл. 2). По данным этой зависимости оптимальный размер образцов находится в интервале от 10 до 50 мм. Следует отметить, что при исследовании физико-механических свойств были отмечены значительные и часто необъяснимые вариации прочностных свойств для разных фрагментов одного и того же метеорита. Например, для трех образцов метеорита Царев данные по прочности различаются почти в три раза (Медведев, 1974б; Медведев и др., 1985).

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ

Для исследования были взяты образцы обычных хондритов – метеорита Губара (Ghubara), метеорита Sayh al Uhaymir 001 (SAUH 001) и два разных фрагмента метеорита Царев (Slyuta и др., 2008; 2009). Обыкновенные хондриты являются наиболее распространенной группой хондритов и метеоритов вообще и подразделяются на три химические подгруппы H, L и LL, различающиеся по содержанию общего железа и сидерофильных элементов ($H > L > LL$) и отношению окисленного железа к металлическому ($H < L < LL$) (Dodd, 1981). Главными минералами являются магнезиальный оливин и бедный кальцием пироксен (гиперстен или бронзит), в подчиненных количествах присутствуют никелистое железо (камасит и тэнит), кислый плагиоклаз (олигоклаз), диопсид и троилит. Акцессорные минералы представлены апатитом, хромитом, ильменитом. Очень близкое соответствие нормативной минера-

Таблица 2. Физико-механические свойства метеорита Царев по данным (Зоткин и др., 1987)

Размер образца, мм	Количество измерений	Среднее, МПа	Коэф. вариации, %
Предел прочности на сжатие			
100 × 100 × 100	2	256	17
70 × 70 × 70	4	354	3
50 × 50 × 50	4	383	21
40 × 40 × 40	5	499	12
25 × 25 × 25	6	387	20
20 × 20 × 20	6	388	17
15 × 15 × 15	6	332	17
12 × 12 × 12	7	372	23
10 × 10 × 10	7	419	13
Предел прочности на растяжение			
50 × 50 × 50	3	43	17
40 × 40 × 40	3	45	8
25 × 25 × 25	5	52	7
20 × 20 × 20	6	48	27
15 × 15 × 15	6	56	11
12 × 12 × 12	8	47	22
10 × 10 × 10	8	62	17

логии, выраженной набором безводных стандартных минералов, и модальной (наблюдаемой) минералогии указывает на то, что вода в эволюции обыкновенных хондритов если и имела какое-то значение, то очень незначительное (Dodd, 1981).

Выраженность в каменных метеоритах хондр варьирует в широких пределах — от отчетливо выраженных, до едва уловимых и прорастающих в матрицу и наоборот. Такая корреляция структурных и минеральных вариаций в хондритах свидетельствует о термальном метаморфизме, который происходил в пределах родительских тел в постаккреционный период. Подобные изменения получили название вторичных. С увеличением степени метаморфизма контуры хондр становятся менее отчетливыми, матрица становится более грубозернистой, состав основных минералов (оливина и пироксена) становится более гомогенным, содержание углерода уменьшается. По характеру и степени термального метаморфизма хондриты подразделяются на 7 петрологических типов, — от неизменных или примитивных (1), которые обычно называют неравновесными, до хондритов с наибольшей степенью метаморфического изменения (7), называемых равновесными (Krot и др., 2003). В этом ряду под действием термального метаморфизма увеличивается степень химического равновесия и структурной перекристаллизации. Примитивные петрологические типы 1 и 2 известны

только для углистых хондритов. Хондриты типа 7 необычны, редки и представлены сложной смесью интенсивно метаморфизованного и переплавленного материала (Dodd, 1981). Структурных деформаций, характерных для земных горных пород при интенсивном метаморфизме в условиях высокого давления, в обыкновенных хондритах при переходе от 3 к 7 петрологическому типу не наблюдается. Упорядоченная ориентировка хондр и других включений отсутствует, а хондры сохраняют свою преимущественно сферическую форму в неискаженном виде (Dodd, 1965). Это подтверждается и отсутствием минералов, указывающих на высокие давления (за исключением минералов, образованных при ударных событиях). По замещению химических элементов, чувствительных к давлению, было установлено, что максимальные статические давления, которым подвергались хондриты в своей эволюции (за исключением ударных нагрузок), не превышали 100 МПа (Heuse, 1978).

По аналогии с метаморфизмом земных горных пород сложилось мнение, что разные структурные типы метеоритов также должны значительно отличаться физико-механическими свойствами, при этом упускается из виду, что метаморфизм земных горных пород характеризуется иным диапазоном шкалы температур и давлений. Из приведенной характеристики петрологических типов метеоритов следует, что давление не превышало 100 МПа, т.е. даже не превышало предела прочности на сжатие обыкновенных хондритов. Различие, возможно, есть, но вряд ли значительное и строго прогрессивное в зависимости от увеличения структурного типа метеорита. Прояснить этот вопрос помогут только качественные экспериментальные данные, проведенные с соблюдением всех необходимых требований и установленных стандартов. Но об этом ниже.

Следы столкновительной истории родительских тел метеоритов в виде деформации и дробления минеральных зерен, брекчирования и образования прожилков, относятся к третичным изменениям. По степени ударного воздействия и ударного метаморфизма выделяются шесть ударных фаций — от S1 до S6. Для обыкновенных хондритов степень ударного метаморфизма определяется по изменению кристаллической структуры оливина и плагиоклаза (Stoffler и др., 1991), в углистых хондритах — по изменению структуры оливина (Scott и др., 1992). В энстатитовых хондритах, в которых оливин является очень редким минералом, степень ударного воздействия определяется по дефектности кристаллов ортопироксена (Rubin и др., 1997). В отличие от предполагаемого прогрессивного влияния степени метаморфизма, ударная фация, по-видимому, оказывает обратное влияние на прочность метеоритов, по крайней мере, ее высокие степени. Пример — Челябинский метеорит со структурным типом LL5 и

ударной фацией S4 (Галимов и др., 2013), характеризующийся в результате высокой степенью деформации и, соответственно, пониженной прочностью.

Находясь на поверхности Земли, метеориты, как и земные горные породы, подвергаются геохимическому выветриванию под действием воды, атмосферы и биосферы (микроорганизмов). Выделяются семь стадий геохимического выветривания (W0-W6) (Wlotzka, 1993). Последовательность стадий изменений каменных метеоритов в результате геохимического выветривания определяется в шлифах. Отсутствие видимого окисления металлов и сульфидов соответствует стадии W0. Отсутствием выветривания, как правило, характеризуются метеориты, собранные сразу после падения. Мелкие прожилки и пленки окисления металла и троилита относятся к стадии W1. Наличие окисленного металла в количестве от 20 до 60% указывает на стадию выветривания W2, а в количестве от 60 до 95% – на стадию W3. Полное окисление металла и сульфидов, но отсутствие каких-либо изменений в силикатах соответствуют стадии W4. Степень выветривания W5 характеризуется изменением темных (мафических) силикатов вдоль трещин. Последняя (W6) стадия выветривания определяется массовым замещением силикатов глинистыми минералами и окислами. Как и для земных горных пород (чем выше стадия выветривания, чем ниже прочность), выветривание также должно оказывать существенное влияние на изменение физико-механических свойств исследуемых метеоритов, что необходимо учитывать.

Метеорит Губара представляет собой обычный хондрит петрографического типа L5. Метеорит был найден в 1954 г. в Омани в пустынной местности. Он выглядит очень свежим и слабо затронут земными процессами выветривания, т.е. характеризуется начальной стадией (Grady, 2000). Более точных данных по стадии выветривания и ударной фации нет. Каменный метеоритный дождь Sayh al Uhaymir 001 (SAUH 001) был найден 16 марта 2000 г. и является одним из крупнейших метеоритных дождей Омани (Korochantsev и др., 2003). Было собрано более 2670 образцов общей массой 450.5 кг. По составу метеорит является обычным хондритом петрографического типа L4/5 (фаялит – 24.7 mol %; ферросилит – 21.4 mol %) с ударной стадией S2. Большое значение для настоящего исследования имеет тот факт, что это достаточно недавнее падение, слабо затронутое земным выветриванием (стадия W1) (Korochantsev и др., 2003), которое не повлияло на физико-механические свойства фрагментов метеорита.

Метеорит Царев также характеризуется мелкозернистой однородной текстурой, лишенной вы-

раженных расслоений и отдельностей. Метеорит характеризуется бимодальным распределением интегральной плотности фрагментов, которая по-видимому, объясняется неоднородным строением (распределением плотности) родительского тела. Около 30% массы метеорита имеет плотность 3.32 г см^{-3} , и около 70% – 3.48 г см^{-3} (Зоткин, Цветков, 1984). Зависимости плотности от массы отдельных фрагментов не наблюдается. Каменный метеоритный дождь Царев был обнаружен в 1968 году в Волгоградской области в России. Всего было собрано 69 образцов общей массой 1325.203 кг (Слюта, 2014). Наибольший фрагмент весил 283.8 кг. По составу метеорит относится к обычным хондритам петрографического типа L5 с содержанием железа до 20.54% (Барсукова и др., 1982). Так же, как Губара и SAUH 001, метеорит Царев отличается хорошей сохранностью и почти не затронут выветриванием. Точное определение по стадии выветривания и ударной фации отсутствует.

Физико-механические свойства метеоритов исследовались методом комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии в соответствии с установленным стандартом (ГОСТ 21153.4-75, Породы горные, 1975). Выбранная методика исследований позволяет получить достаточно большую статистику измерений и, соответственно, достаточно надежные данные на относительно небольшом объеме материала, т.е. фактически на одном образце с общим размером от 10 до 20 см. Это очень важно из-за особой ценности и ограниченности метеоритного материала. Этот метод также оказался наиболее удобным для исследования пространственного трехмерного распределения физико-механических свойств в отдельном образце. Определение предела прочности на сжатие и растяжение проводилось на воздушно-сухих образцах на испытательных машинах серии CD-10 и CD-100 (производства VEB Werkstoffpruffmaschinen, Leipzig, Germany), позволяющих осуществлять пропорциональное нагружение в диапазоне максимальных нагрузок до 10 и 100 т соответственно. Исследования проводились в Институте проблем комплексного освоения недр (ИПКОН РАН).

Из-за отсутствия достаточного количества материала из фрагмента метеорита Губара были вырезаны только две пластины размером $22 \times 37 \times 62 \text{ мм}$ и один кубик размером $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$ (Slyuta и др., 2008). Для исследования физико-механических свойств по трем направлениям фрагмент метеорита Sayh al Uhaymir 001 размером $9 \times 10 \times 12 \text{ см}$ был разрезан на три перпендикулярных друг другу пластины, каждая толщиной 20 мм (рис. 1а), и один кубик со сторонами, параллельными всем трем пластинам и размером $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}$. Два разных фрагмента метеорита Царев (№№ 15384.1 и 15390.9) каждый были разрезаны

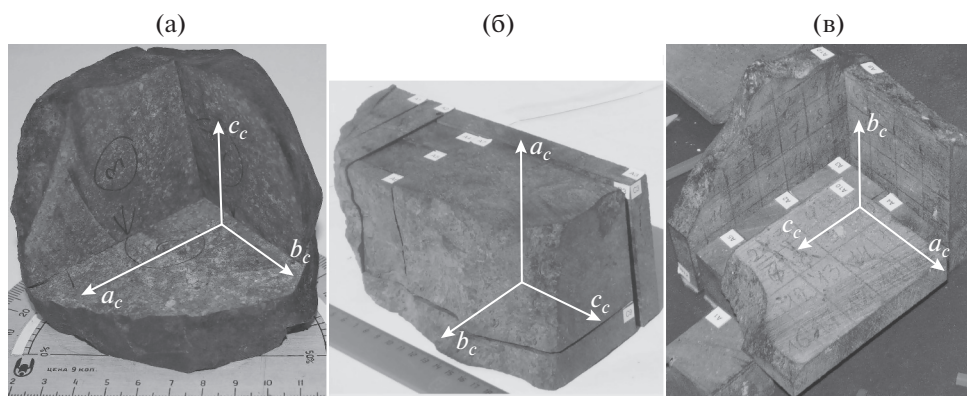


Рис. 1. Ориентация эллипсоида анизотропии физико-механических свойств с полуосями $a_c > b_c \geq c_c$ во фрагментах метеоритов: (а) метеорит SAUH 001; (б) метеорит Царев, фрагмент № 15390.9; (в) метеорит Царев, фрагмент № 15384.1.

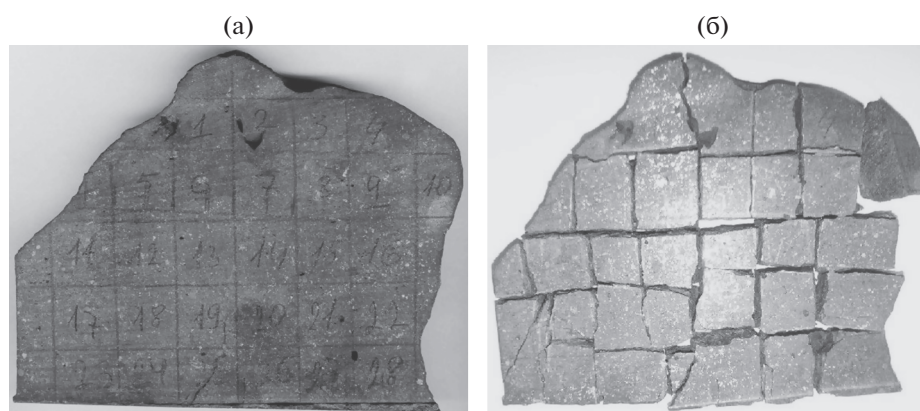


Рис. 2. Определение прочности на растяжение методом ориентированного раскалывания пластины фрагмента метеорита Царев № 15384.1 на кубики полуправильной формы: (а) разметка пластины; (б) пластина, расколотая на кубики полуправильной формы.

также на три перпендикулярных друг другу пластины толщиной по 20 мм, и несколько кубиков со сторонами, параллельными всем трем пластинам и размером $40 \times 40 \times 40$ мм (рис. 1б, 1в). Фрагмент № 15384 в своей первичной форме представлял собой конусообразный многогранник размером $28 \times 28 \times 23$ см и весом 24.8 кг (Слюта, 2014). Первичный фрагмент № 15390 имел полиэдрическую вытянутую форму размером $50 \times 38 \times 31$ см и весил 104.2 кг (Слюта, 2014).

Для определения предела прочности на растяжение применялся метод раскалывания пластин образцов клиньями с углом заточки 90° с измерением приложенной нагрузки и разрушающего усилия. Длина раскола определялась с погрешностью не более $+0.5$ мм при длине не менее 20 мм. Каждая пластина в зависимости от ее размера раскалывалась на кубики полуправильной формы размерами $20 \times (20-30) \times (20-30)$ мм (рис. 2). Направление растяжения располагается перпендикулярно линии раскалывания.

Каждая из трех пластин раскалывалась на кубики по двум перпендикулярным друг другу направлениям. Соответственно, предел прочности на растяжение также учитывался по двум разным направлениям, параллельным общим осям координат в образце (например, x и y , x и z , или y и z). Определение предела прочности на сжатие выполнялось раздавливанием кубических образцов полуправильной формы, полученных в процессе раскалывания пластин после определения прочности на растяжение (рис. 3), и кубика размером $40 \times 40 \times 40$ мм при измерении деформационных характеристик. Ось сжатия направлена перпендикулярно плоскости пластины. При напряжениях, превышающих предел прочности на сжатие, происходило взрывоподобное дробление исследуемого образца (рис. 3б). Такое явление называют реологическим взрывом (Гораздовский, 1976).

Полученные данные по физико-механическим свойствам метеорита Губара показаны в табл. 3. Из-за отсутствия достаточного количества

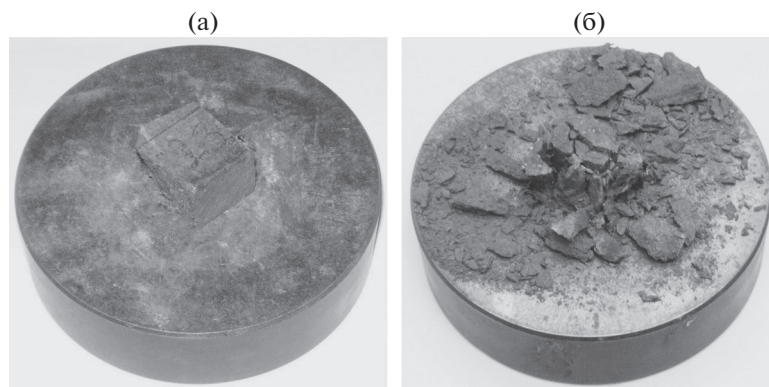


Рис. 3. Определение предела прочности на сжатие раздавливанием кубических образцов полуправильной формы, полученных в процессе раскалывания пластин.

материала трехмерное распределение физико-механических свойств в метеорите Губара не исследовалось. Пространственное трехмерное распределение физико-механических свойств в образцах метеоритов SAUH 001 и Царев показано в табл. 4. Величина предела прочности на сжатие по одному из трех направлений сильно (в 1.6 раза) отличается от остальных двух, которые почти равны. Во всех трех исследованных образцах символами a_c , b_c и c_c были отмечены направления осей координат от меньшего к большему значению предела прочности на сжатие (рис. 1).

Таким образом, пространственное трехмерное распределение предела прочности на сжатие во всех трех образцах может быть представлено вытянутым эллипсоидом анизотропии с полуосями $a_c > b_c \geq c_c$, когда по одному из направлений (a_c) предел прочности на сжатие выше значений по двум другим направлениям ($b_c \geq c_c$). Соответственно, сильные необъяснимые вариации прочностных свойств далеко за пределами допустимых коэффициентов вариации, обнаруженные в образцах одного метеорита (Медведев и др., 1985; Зоткин и др., 1987), согласно экспериментальным данным обусловлены сильной пространственной анизотропией этих свойств. По осям эллипсоида анизотропии данные находятся уже в пределах нормальных, т.е. допустимых коэффициентов вариации (табл. 4).

В образце метеорита SAUH 001 распределение значений предела прочности на растяжение, в отличие от предела прочности на сжатие, почти

изотропное и может быть аппроксимировано фигурой, близкой к сфере (табл. 4). Распределение значений предела прочности на растяжение в обоих образцах метеорита Царев по одному из направлений отличается на 15–20% и, по-видимому, также объясняется анизотропией (табл. 4).

Фрагмент метеорита SAUH 001 имел округлую и вытянутую форму размером $9 \times 10 \times 12$ см. Количество измерений соответствует количеству кубиков полуправильной формы, полученных из пластины и подвергнутых сжатию и разрушению (табл. 4). Самая маленькая пластина с наименьшим количеством измерений предела прочности на сжатие была ориентирована перпендикулярно наиболее длинной оси фигуры образца метеорита (рис. 1а). Таким образом, в данном фрагменте метеорита длинная ось a фигуры обломка совпадает с направлением a_c эллипсоида анизотропии, т.е. с длинной полуосью его эллипсоида.

Длинная ось a фигуры фрагмента метеорита Царев № 15390 ($50 \times 38 \times 31$ см), равная 50 см, также отчетливо совпадает с максимальным направлением a_c эллипсоида анизотропии (табл. 4). Фрагмент метеорита Царев № 15384 имел форму многогранника с осями $a = b < c$ ($28 \times 28 \times 23$ см), что не позволило, как в предыдущих фрагментах, точно сориентировать схему разреза относительно главных полуосей фигуры фрагмента. Образец был разрезан под углом к первичной (с коркой “загара”) поверхности обломка, т.е. относительно плоскости предыдущего распила, являющегося основанием пирамиды. Существенное разли-

Таблица 3. Физико-механические свойства метеорита Губара

Название	Среднее значение, МПа	Количество измерений	Коэффициент вариации, %
Предел прочности на сжатие	72	5	30.7
Предел прочности на растяжение	24	5	30.5

Таблица 4. Трехмерное распределение физико-механических свойств в обыкновенных хондритах

Название	Оси эллипсоида анизотропии			Среднее для образца
	a_c	b_c	c_c	
Метеорит SAUH 001 ($a_c/c_c = 1.6$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	143	94	91	105
Количество измерений	6	7	10	23
Коэффициент вариации, %	20	29	23	31
Предел прочности на растяжение, МПа	18	17	18	18
Количество измерений	13	13	14	40
Коэффициент вариации, %	28	26	27	27
Метеорит Царев, обр. № 15390.9 ($a_c/c_c = 1.6$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	262	168	160	203
Количество измерений	25	27	13	65
Коэффициент вариации, %	19	37	29	35
Предел прочности на растяжение, МПа	28	34	27	29
Количество измерений	23	20	33	76
Коэффициент вариации, %	32	35	31	34
Метеорит Царев, обр. № 15384.1 ($a_c/c_c = 1.3$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	223	182	174	194
Количество измерений	22	17	20	59
Коэффициент вариации, %	29	25	29	30
Предел прочности на растяжение, МПа	31	34	29	31
Количество измерений	12	24	25	61
Коэффициент вариации, %	33	30	42	35

чие между собой наименьших значений (b_c и c_c) предела прочности на сжатие в этом образце, и их повышенное значение по отношению к b_c и c_c в образце № 15390.9 указывает, вероятно, на то, что истинная ориентация эллипсоида анизотропии в этом образце отличается от полученного эллипсоида анизотропии. На это же, по-видимому, указывает и меньшее значение величины анизотропии ($a_c/c_c = 1.3$) по сравнению с величиной анизотропии в образце № 15390.9 ($a_c/c_c = 1.6$). С другой стороны, можно предположить, что более изометричная форма фрагмента ($28 \times 28 \times 23$ см) и является следствием меньшей анизотропии в данном образце. Следует отметить, что метеорит SAUH 001 и метеорит Царев имеют одинаковую величину анизотропии, хотя предел прочности этих образцов отличается в два раза (табл. 4). По крайней мере, это справедливо по отношению к образцу метеорита Царев № 15390.9, где ориентация эллипсоида анизотропии также точно совпадает с ориентацией главных осей первичной формы фрагмента.

Обнаруженная пространственная анизотропия обыкновенных хондритов в среднем аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением

главных полуосей $a : (b = c) = 1.5 : 1$. Измеренный предел прочности на сжатие обыкновенных хондритов с учетом всех крайних средних значений по отдельным направлениям находится в интервале от 91 до 262 (с учетом метеорита Губара – 72–262 МПа), а с учетом только средних значений в целом по метеоритам – от 105 до 203 МПа. Измеренные образцы относятся к наиболее распространенным типам обыкновенных хондритов. Полученный диапазон достаточно широк и охватывает практически все известные экспериментальные данные, и может характеризовать весь класс обыкновенных хондритов. Предел прочности на растяжение также с учетом крайних значений по отдельным направлениям находится в интервале от 17 до 34 МПа, а с учетом только средних значений по метеоритам – от 18 до 31 МПа (табл. 4). Данная методика экспериментальных исследований пространственного распределения прочностных свойств позволила получить до 140 измерений в одном относительно небольшом образце метеорита и, соответственно, значительно повысить надежность данных.

Сильная анизотропия, с одной стороны, объясняет значительные вариации прочностных свойств в образцах одного метеорита, с другой стороны, выдвигает совершенно новые требования

как к методике проведения экспериментальных исследований физико-механических свойств метеоритов, так и к получаемым данным. При оценке коэффициента вариации и при достаточном количестве измерений крайнее нижнее и верхнее значения часто отличаются более чем в 3 раза в зависимости от степени дефектности образца. Дефекты присутствуют на разных иерархических уровнях. Это дефекты минеральных зерен – трещины, совершенная спайность, газовой-жидкие включения, дефекты кристаллической решетки и др. Дефекты по границам минеральных зерен. Наконец, дефекты, сравнимые с размером образца. Очень важно при измерении физико-механических свойств горных пород следовать установленным стандартам и учитывать в том числе и возможное наличие анизотропии. Использование единичных измерений для сравнения физико-механических свойств метеоритов, например, разных петрологических типов, разных ударных фаций и с разной степенью выветривания возможно лишь с соответствующей оговоркой и только на качественном уровне (больше, меньше), поскольку единичное измерение может значительно отличаться от надежно установленного среднего значения, полученного с учетом всех необходимых требований. Только в этом случае можно надежно установить, действительно ли отличаются метеориты разных типов и насколько.

Следует отметить, что из-за малого числа известных экспериментальных исследований физико-механических свойств внеземного вещества, а также и из-за постоянного совершенствования методики измерений, в настоящее время надежный сравнительный анализ прочностных свойств метеоритов различных типов пока недоступен. Сравнительный анализ прочностных свойств обыкновенных хондритов (Kimberley, Ramesh, 2011), из-за отсутствия данных ограниченный лишь двумя петрологическими типами, сделанный преимущественно по единичным измерениям, лишь подтверждает вышесказанное. Реологические и физико-механические свойства конкретных горных пород определяются структурой, химическим и минеральным составом и очень плохо, или практически не поддаются теоретическим исследованиям (Slyuta, Voropaev, 1997; Kimberley, Ramesh, 2011). Соответственно, единственным путем получения надежных данных по прочностным свойствам внеземного вещества остаются прямые экспериментальные и наблюдательные исследования.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛИСТЫХ ХОНДРИТОВ ТИПА СМ/СR

Углистые хондриты, из которых по данным оптических (спектральных) дистанционных ис-

следований преимущественно состоят С-астероиды, характеризуются наиболее высокой степенью окисленности вещества среди всех метеоритов и состоят в значительной степени из гидратированных железо-магнезиальных силикатов (серпентина или хлорита). Углистые хондриты также отличаются высоким содержанием летучих компонентов, в том числе воды (до 20 мас. %), углерода (до 5 мас. %), серы и других, и присутствием органического вещества (C_{org} до 5 мас. %) абиогенного происхождения. Хондры состоят из оливина и (или) пироксена. По структурным и геохимическим признакам углистые хондриты подразделяются на ряд подгрупп. Следует отметить, что содержание углерода не является отчетливым критерием принадлежности метеоритов к углистым хондритам. Если часть метеоритов этой группы действительно обогащены углеродом (СI-, СМ- и СR-хондриты), то другая часть (например, СО- и CV-хондриты) содержит углерод в столь же малых количествах, как и некоторые обыкновенные и энстатитовые хондриты. Матрица С-хондритов состоит преимущественно из тонкозернистого материала (за исключением случаев интенсивного метаморфизма), частично или полностью сложенного водными силикатами, магнетитом, троилитом и другими минералами, устойчивыми при низких температурах. Большинство углистых хондритов является брекчиями. В отличие от обыкновенных и энстатитовых хондритов, большинство углистых хондритов не подвергались воздействию интенсивного термального метаморфизма, т.е. являются не только химически, но и физически наиболее примитивными объектами (Anders, 1971). При этом первичный минеральный состав всех углистых хондритов, и особенно СI- и СМ-хондритов, в той или иной степени подвергся сильной гидратации, т.е. изменениям под действием воды. Предполагается, что гидратация с массовым образованием фило-силикатов происходила еще в родительских телах (астероидах) (Endress и др., 1996). Углистые хондриты обладают устойчивой остаточной намагниченностью, по-видимому, внеземного происхождения.

Предел прочности на растяжение для углистых метеоритов инструментально не измерялся, но оценивался по кривой нагрузка/смещение для нескольких метеоритов при раздавливании фрагментов метеоритов неправильной формы размером около 100 мкм (Tsuchiyama и др., 2008; 2009). Широкий разброс измеренных значений предела прочности на растяжение от 0.7 до 8.8 МПа (табл. 5), а также коэффициентов их вариации, выходящих далеко за пределы обычно допустимых значений (около 30%) объясняется несоответствием методики исследований стандартным требованиям, принятым при изучении физико-механических свойств горных пород (Породы горные, 1975) и описанных выше.

Таблица 5. Физико-механические свойства углистых хондритов (Tsuchiyama и др., 2008; 2009; Jenniskens и др., 2012)

Метеорит	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Коэффициент вариации*, %
Murchison (CM)	50	2.0 ± 1.5	75
Murray (CM)		8.8 ± 4.8	55
Ivuna (CI)		0.7 ± 0.2	29
Orgueil (CI)		2.8 ± 1.9	68
Tagish Lake (CI/CM)		0.8 ± 0.3	38
Sutter's Mill (CM)	82 ± 6		

* Коэффициент вариации указан только для значений предела прочности на растяжение.

Таблица 6. Средние значения плотности, объемного веса и пористости метеоритов* (Britt и др., 2002)

Тип метеорита	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Средняя пористость, %
Обыкновенные хондриты типа H	3.84	3.40	11.5
Обыкновенные хондриты типа L	3.75	3.34	10.8
Обыкновенные хондриты типа LL	3.56	3.19	10.4
Ахондриты	3.20	2.97	7.0
CI углистые хондриты	2.27	2.12	11.0
CM углистые хондриты	2.71	2.21	12.0
CR углистые хондриты	3.11	2.92	6.0
CV углистые хондриты	3.51	3.10	11.0
CO углистые хондриты	3.69	3.11	16.0

* Свойства отдельных образцов метеоритов различных типов могут значительно отличаться от средних значений.

Размер хондр в исследуемых образцах метеорита Murchison составляет около 200 мкм (Miura и др., 2008). Средний же размер исследованных фрагментов углистых хондритов составлял около 100 мкм, а максимальный не превышал 200 мкм (Tsuchiyama и др., 2008; 2009), т.е. в данном случае можно говорить о прочности отдельных фрагментов хондр, матрицы, минеральных сростков, но не метеорита в целом. Необходимо также учитывать и достаточно высокую пористость углистых хондритов, которая в метеорите Murchison достигает 20% (Miura и др., 2008). Углистые хондриты характеризуются меньшей плотностью и большей пористостью, чем обыкновенные хондриты (табл. 6).

Предел прочности на сжатие, измеренный на образце метеорита Murchison (CM), представлявшего собой цилиндр диаметром 5 и высотой 10 мм (Miura и др., 2008), в большей степени относится к веществу метеорита в целом и равен 50 МПа. Предел прочности на сжатие метеорита Sutter's Mill составляет 82 МПа (Jenniskens и др., 2012). К сожалению, в работе отсутствует описание методики измерения. Для земных горных пород характерное соотношение между пределом прочности на сжатие и растяжение, равно 8–9 (Протодыяков и др., 1981; Справочник (Кадастр), 1975). Для обыкновенных хондритов соотношение между

пределом прочности на сжатие и растяжение находится в пределах 6–7 (табл. 4). Вероятное значение предела прочности на растяжение для углистых хондритов можно принять равным 9 ± 3 МПа.

Как видно из табл. 4, интервал средних минимальных и максимальных значений предела прочности на сжатие для изученных образцов обыкновенных хондритов с учетом анизотропии составляет 105–203 МПа, а предел прочности на растяжение – 18–31 МПа. Предполагая, что относительная величина пространственной анизотропии прочностных свойств углистых хондритов примерно такая же, как у изученных обыкновенных хондритов, вероятный диапазон значений предела прочности на сжатие углистых хондритов можно принять равным 35–85 МПа, а диапазон значений предела прочности на растяжения равным 6–12 МПа.

НАБЛЮДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФРАГМЕНТАЦИИ КРУПНЫХ КАМЕННЫХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В табл. 7 и 8 приведены данные по 39 метеороидам, вхождение в атмосферу и дробление которых наблюдалось в период с 1961 г. по настоящее время с помощью различных инструментальных

методов – оптических, сейсмических и акустических. В табл. 7 рассматриваются 24 метеороида, для которых были найдены метеориты и состав которых достоверно известен. В табл. 8 представлены 15 метеороидов без найденных падений, но с предполагаемым каменным составом.

Примерный состав метеороидов без найденных падений оценивается по разнице в высоте их погасания, которая в пределах популяции болидов с аналогичными или похожими параметрами (скорость, масса, наклон траектории), как предполагается, обусловлена преимущественно разным составом метеороидов (Ceplecha, McCrosky, 1976). Были выделены три основные группы метеороидов. Группа I предположительно ассоциируется с наиболее прочными и плотными ($>3 \text{ г см}^{-3}$) обыкновенными хондритами, группа II – с более слабыми углистыми хондритами, и группа III – с еще более хрупким и слабым кометным веществом (табл. 8). В последней группе выделяются еще две подгруппы в зависимости от предполагаемой плотности вещества – IIIa (около 0.75 г см^{-3}) и IIIb (0.3 г см^{-3}) (Ceplecha, 1988; 1994). В качестве дополнительного параметра для оценки примерного состава болидов также используется коэффициент абляции, типичные значения которого для групп I, II, IIIa и IIIb примерно равны 0.014, 0.042, 0.1 и $0.21 \text{ с}^2 \text{ км}^{-2}$ соответственно (Ceplecha и др., 1998). Конечно, более точное представление о составе болида дает их спектр излучения, записанный с помощью спектрографов. Пока единственным болидом, для которого удалось записать спектр высокого разрешения и найти метеориты, является Benesov (Borovicka и др., 1998a; 1998b).

Оцененная примерная первичная масса метеороидов до вхождения в атмосферу была очень разной от $\sim 2.8 \text{ кг}$ (метеороид Kacov) (табл. 8) до $\sim 13000 \text{ т}$ (метеороид Челябинский) (табл. 7). Большинство из найденных падений по составу были обыкновенными хондритами (табл. 7). Два метеороида оказались ахондритами – Bunburra Rockhole с первичной массой около 22 кг (Bland и др., 2009; ReVelle и др., 2004; Spurny и др., 2009), и Almahata Sitta с первичным размером около 4.1 м и с первичной массой около 83 т (Jenniskens и др., 2009). Три метеороида (Maribo, Sutter's Mill и Tagish Lake) были углистыми хондритами (Brown и др., 2002; Naack и др., 2012; Jenniskens и др., 2012). Только один метеорит (Neuschwanstein) из этих падений оказался энстатитовым хондритом EL6 (Bischoff, Zipfel, 2003). Подавляющее большинство болидов без найденных падений также ассоциируется с более плотными и более прочными обыкновенными хондритами (табл. 8). Только один из наблюдаемых болидов Breclav (и возможно, Chotebor) был ассоциирован с группой углистых хондритов (табл. 8).

В большинстве случаев наблюдалось несколько хорошо выраженных дроблений (обычно от 3 до 6) с потерей массы тела от 16% до 61% относительно массы до фрагментации в каждой из этих точек (Pорова и др., 2011). Измеренная скорость метеороидов в первой точке дробления составляла от $12.3 \text{ (Almahata Sitta)}$ (табл. 7) до 31.8 км с^{-1} (Munich) (табл. 8), а в последней точке дробления – от $4.1 \text{ (Mason Gully)}$ (табл. 7) до 29.8 км с^{-1} (Munich) (табл. 8). Величина аэродинамического давления в первой точке дробления была относительно невысокой и в зависимости от высоты дробления (плотности атмосферы) и скорости метеороида для обыкновенных хондритов составляла от 0.03 (Grimsby) до 3.9 МПа (Villalbeto de la Pena) (табл. 7), или, возможно, до 5.9 МПа (Turjiremetry) (табл. 8). В последней точке дробления обыкновенные хондриты разрушались при аэродинамической нагрузке от 1.0 МПа (Peekskill) до 18 МПа (Chelyabinsk) (табл. 7), или с учетом табл. 8 – от 0.4 МПа (Kacov). Следует отметить, что в большинстве случаев аэродинамическое давление определялось с точностью не хуже 10–30% (Pорова и др., 2011). Небольшие дробления с незначительной потерей массы (до 1–2%) наблюдались также и на высотах от 70 до 55 км при очень низких аэродинамических нагрузках – в пределах $0.03\text{--}0.1 \text{ МПа}$.

В отличие от обыкновенных хондритов, характеризующихся достаточно большим количеством наблюдений, для углистых хондритов наблюдались пока три падения с найденными метеоритами (табл. 7) и один болид, ассоциированный с группой углистых хондритов (Breclav) (табл. 8). Аэродинамическая нагрузка в первой точке дробления для углистых хондритов оценивается от 0.3 до 0.9 МПа , а в последней точке дробления с максимальной нагрузкой – от 2.2 до 3.0 МПа (или, с учетом болида Chotebor с не совсем ясным составом, – от 0.5 до 2.8 МПа). Учитывая пока еще очень малое количество наблюдений, данные по углистым хондритам можно использовать для сравнения лишь с известной оговоркой.

В очень редких случаях (пока это единственное событие, которое наблюдалось с помощью инструментальных методов) крупные каменные метеороиды, подвергаясь максимальной аэродинамической нагрузке, тем не менее, по-видимому, сохраняли свою основную массу и размеры и почти без дробления в атмосфере достигали поверхности Земли и образовывали ударный кратер. Это метеорит Carancas, упавший в Перу 15 сентября 2007 г. и образовавший кратер диаметром 13.5 м (Tancredi и др., 2009; Pорова и др., 2011). По составу метеорит относится к обыкновенным хондритам H4-5 (Connolly и др., 2008). По оценке (Borovicka, Spurny, 2008) максимальная аэродинамическая нагрузка на метеороид, первичная масса

Таблица 7. Наблюдаемые параметры фрагментации крупных каменных метеороидов в атмосфере Земли, для которых найдены метеориты*

№ п/п	Метеороид	Тип	Ударная фазия	Масса до дробления, кг	Скорость, км с ⁻¹		Высота дробления, км		Аэродинамическое давление, МПа		Ссылки
					I	II	I	II	I	Max	
1	Almahata Sitta	Ach(U)	S0	70000	12.3	10.9?	45.0	33.0	0.3	1.3	Jenniskens и др., 2009; Borovicka, Charvat, 2009
2	Benesov	LL3.5, H5	S3	3000–4000	21.0	–	56.0	24.0	0.2	9.0	Borovicka и др., 1998a; Borovicka и др., 1998b; Spruy и др., 2014
3	Bunburra Rockhole	Ach(Euc)	S1	21.5	13.2	7.6	54.9	31.3	0.11	0.9	Bland и др., 2009; ReVelle и др., 2004; Spruy и др., 2009; Spruy и др., 2012a
4	Buzzard Coulee	H4	S2	8000	18.0	–	–	17.6	–	–	Hildebrand и др., 2009; Milley, 2010
5	Carancas	H4/5	S3	1300–10000	12–17	–	–	–	–	>15	Conolly и др., 2008; Borovicka, Spruy, 2008; Tancredi и др., 2009
6	Chelyabinsk	LL5	S4	13000000	19.16	3.2	54.0	23	0.2	18	Brown и др., 2013a; Borovicka и др., 2013a; Porova и др., 2013; Галимов и др., 2013; Borovicka и др., 2015
7	Grimby	H5	S2	30	20.9	13.0	70.0	30.0	0.03	3.6	Brown и др., 2011; Porova и др., 2011
8	Innisfree	L5	S2	39	14.5	7.8	55.6	23.7	0.1	3.0	Halliday и др., 1978; Halliday и др., 1981; Ceplecha, ReVelle, 2005
9	Jesenice	L6	S3	170	13.6	6.0	46.0	23.0	0.3a	3.9	Spruy и др., 2010; Bischoff и др., 2011
10	Kosice	H5	S3	3500	28.3	4.5	37.1	30.5	~1	6.0	Borovicka и др., 2013b
11	Krizevci	H6	S3	50	18.21	4.5	32.0	21.8	–	3.6	Segon и др., 2011; Borovicka и др., 2015
12	Lost City	H5	S4	153	14.0	5.2	41.0	22.0	0.7	2.8	McCrosky и др., 1971; Ceplecha, 1996; Ceplecha, ReVelle, 2005

СЛЮТА

Таблица 7. Окончание

№ п/п	Метеороид	Тип	Ударная фация	Масса до дробления, кг	Скорость, км с ⁻¹		Высота дробления, км		Аэродинамическое давление, МПа		Ссылки
					I	II	I	II	I	Max	
13	Maribo	CM2	S0	74	28.5	—	37.1	30.5	—	3.0	Нааск и др., 2012; Brown и др., 2013b; Borovicka и др., 2015
14	Mason Gully	H5	S1	40	14.65	4.1	35.8	23.8	—	1.5	Towner и др., 2011; Spurny и др., 2012b; Borovicka, 2014; Borovicka и др., 2015
15	Moravka	H5/6	S2	1500	22.0	7.2	>46	24.0	<0.9	5.0	Borovicka и др., 2003a; Borovicka и др., 2003b; Borovicka, Kalenda, 2003
16	Neuschwanstein	EL6	S2	300	19.0	12	34.0	20.8	3.6	9.6	Spurny и др., 2002; Spurny и др., 2003; ReVelle и др., 2004
17	Novato	L6	S4	80	13.67	—	36.0	~22	—	—	Jenniskens и др., 2014
18	Park Forest	L5	S5	10000	19.5	10?	70.0	22.0	0.03	6.5	Brown и др., 2004
19	Peekskill	H6	S2	3000	13.7	5.4	41.6	30.5	0.7	1.0	Brown и др., 1994; Ceplecha и др., 1996
20	Pribram	H5	S1/S3	1200	20.0	—	44.0	23.3	0.9	>0.9	Ceplecha, 1961; Spurny и др., 2003; Borovicka, Kalenda, 2003
21	St. Robert	H5	—	1200–2000	13.3	12.7	36	25.0	0.9	—	Brown и др., 1996
22	Sutter's Mill	CM	—	40000	28.6	—	47.6	—	0.9	—	Jenniskens и др., 2012
23	Tagish Lake	CI/CM	S1	52000	15.5	13	48.0	32.0	0.3	2.2	Brown и др., 2000; Brown и др., 2002; Hildebrand и др., 2006
24	Villabeto de la Pena	L6	S4	530	14.8	10.5	30.0	24.0	3.9	5.1	Llorca и др., 2005; Trigo-Rodriguez и др., 2006; Bischoff и др., 2013

* Высота и скорость даны только для первой (I) и последней (II) фрагментации (Pорова и др., 2011). Аэродинамическое давление дано для первой (I) фрагментации и максимальное значение (Max), которое в большинстве случаев совпадает с последней (II) фрагментацией (за исключением Lost City, Moravka).

Таблица 8. Наблюдаемые параметры фрагментации крупных каменных метеороидов в атмосфере Земли, для которых метеориты не были найдены*

№ п/п	Метеороид	Тип (группа)	Масса до дробления, кг	Скорость, км с ⁻¹		Высота дробления, км		Аэродинамическое давление, МПа	
				I	II	I	II	I	II
1	Breclav	II	500	21.8	20.5	47.7	36.2	0.6	2.8
2	Chotebor	I–II	11	–	26.6	–	52.9	–	0.5
3	El Paso ^a	I	8000	25.0			~30	–	7.5
4	Greenland ^b	I	36000(8000)	30.0		55.0	26.0	0.4–0.6	10.0
5	Jesenik	I	5	–	18.0	–	39.2	–	1.6
6	Kacov	I	2.8	13.1	11.1	49.0	40.7	0.2	0.4
7	Legnica	I	65	16.7	14.3	46.3	37.0	0.5	1.2
8	Martin	I	26	16.6	10.9	67.0	29.3	0.04	2.5
9	Munich	I	28	31.8	29.8	63.1	49.0	0.25	1.2
10	Oswiecim	I	72	22.9	15.0	59.1	32.0	0.2	3.1
11	Senohraby	I	3.6	17.3	16.0	46.5	42.0	0.45	0.7
12	Sumava ^c	–	5000			76.0	67.0	0.025	0.14
13	Turji-Remety	I	4300	16.9	13.6	29.0	21.9	5.9	11.8
14	Vimperk	I	105	13.2	9.9	34.4	25.9	1.7	3.5
15	Zdiar	I	11	28.1	27.1	48.6	42.6	1.0	2.0

* Высота, скорость и аэродинамическое давление даны только для первой (I) и последней (II) фрагментации (Порова и др., 2011).
^aHildebrand и др., 1999; ^bPedersen и др., 2001; ^cBorovicka, Spurny, 1996.

которого оценивается в пределах 1300–10000 кг, как минимум превышала 15 МПа. По другим оценкам (Kenkmann и др., 2009) максимальная аэродинамическая нагрузка не превышала 18 МПа.

Не менее редко наблюдаются и противоположные случаи, когда полное дробление крупных метеороидов происходило при очень низких аэродинамических нагрузках. Таким примером является болид Sumava с первичной массой около 5000 кг, который испытал несколько дроблений и вспышек в интервале высот от 76 до 67 км (Borovicka, Spurny, 1996) при аэродинамических нагрузках от 0.025 до 0.14 МПа (Nemtchinov и др., 1999). Предполагается, что объект был кометного происхождения, хотя орбита его и не была строго кометной. Следует отметить, что типичная величина предела прочности на растяжение материала кометного ядра действительно очень низкая, и составляет около 2 кПа (Слюта, 2009).

Челябинский метеороид вошел в верхнюю атмосферу Земли со скоростью около 19.03 км с⁻¹ (Borovicka и др., 2015). По своим размерам (19.8 ± ± 4.6 м) и первичной массе (около 13000 т) Челябинский болид оказался самым крупным из когда-либо наблюдавшихся и зарегистрированных с помощью различных инструментальных методов

(Порова и др., 2013; Borovicka и др., 2015). Дробление метеороида началось на высоте около 54 км при величине аэродинамического давления около 0.2 МПа (табл. 7). Пик яркости, вызванный разрушением метеороида, наблюдался на высоте 29.7 км. При этом большой фрагмент метеороида пережил нагрузку в 15 МПа без дальнейшего разрушения (Borovicka и др., 2015).

Челябинский метеорит также относится к наиболее распространенному типу каменных метеороидов – к обыкновенным хондритам. По содержанию железа и соотношению его окисленной и восстановленной формы челябинский метеорит относится к химическому типу LL (Галимов и др., 2013). По степени термального метаморфизма метеорит относится к 5 петрологическому типу и характеризуется умеренным ударным метаморфизмом стадии S4. Метеорит был обнаружен сразу после падения и степень его геохимического выветривания, соответственно, нулевая (W0). По структуре метеорит представляет собой ударно расплавленную мономиктовую брекчию, в которой обильные трещины заполнены прожилками темного тонкозернистого ударного расплава. Химический состав темного ударного расплава близок к валовому составу метеорита.

Таким образом, обычная максимальная аэродинамическая нагрузка, при которой наблюдалось дробление обыкновенных хондритов, не превышала 15–18 МПа, что примерно почти в 2 раза меньше предела прочности на растяжение обыкновенных хондритов (табл. 4). В редких случаях, когда каменный метеороид почти не подвергался дроблению и достигал поверхности Земли, образуя ударный кратер, максимальная аэродинамическая нагрузка могла достигать 18–20 МПа. Относительно углистых хондритов, можно лишь сказать, что максимальная аэродинамическая нагрузка при дроблении углистых хондритов пока не превышает 3 МПа, что примерно также в два раза меньше предела прочности на растяжение углистых хондритов, который оценивается в интервале 6–12 МПа. Данные по углистым хондритам, конечно, предварительные и требуют своего дальнейшего подтверждения с помощью, как дополнительных наблюдений, так и экспериментальных исследований.

Следует ожидать, что более прочные объекты будут разрушаться при более высоких аэродинамических нагрузках. Дробление железного метеорита Сихотэ-Алинь произошло на высоте нескольких километров (Кринов, 1963). Предполагается, что произошло это на высоте около 10 км, где скорость метеороида составляла не менее 10 км с^{-1} , а аэродинамическая нагрузка могла достигать 40 МПа (Бронштэн, 1981). По данным моделирования (Немчинов, Попова, 1997) с учетом размеров образованных кратеров и кратерного поля, в разных моделях с различным числом точек фрагментации (от 5 до 1) последняя основная фрагментация в зависимости от модели происходила при аэродинамической нагрузке в диапазоне от 14.7 до 48.9 МПа. Наиболее близка к наблюдаемому данным модель с одним основным дроблением на высоте 14.7–10 км при аэродинамической нагрузке 37 МПа. Даже с учетом всех этих данных, тем не менее, значения предела прочности на растяжение и разрушение поликристаллического образца метеорита Сихотэ-Алинь также хорошо согласуются с максимальными значениями аэродинамических нагрузок для крупных железных метеороидов и составляет 43 МПа (Явнель, 1963; Слюта, 2013).

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ КРУПНЫХ КАМЕННЫХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Фронтальное аэродинамическое давление является одной из немногих природных нагрузок для малых тел, характер которой в целом соответствует одноосной раскалывающей нагрузке при максимальном давлении на фронтальной поверхности и нулевом на тыльной поверхности. При этом поле напряжений будет характеризоваться

максимальными скалывающими напряжениями в областях лобовой и боковой частей поверхности тела (Фадеев, 1967; Григорян, 1979). В этом случае прочность материала метеороида определяется пределом прочности на растяжение, т.е. величиной растягивающих напряжений, при которых происходит разрушение материала.

Разрушение происходит по границам структурных элементов или по дефектам прочности (трещинам) под действием статических нагрузок, которые в течение нескольких секунд полета метеорита в атмосфере со скоростью 10–30 км с^{-1} постепенно возрастают с увеличением плотности атмосферы. Причину значительной наблюдаемой разницы максимальных аэродинамических нагрузок и известных пределов прочности каменных метеоритов, по-видимому, следует искать в прочностной неоднородности и структуре метеороидов (Цветков, Скрипник, 1991). Исследование железных и каменных метеоритов также показало, что дробление происходило преимущественно по границам структурных элементов (Кринов, 1955; 1963).

Любой дефект в сплошной среде (полость или трещина) является концентратором напряжений. Чем ближе к дефекту, тем больше напряжение. Максимальная концентрация напряжений локализуется в области дефекта с максимальной кривизной поверхности, т.е. в вершине трещины, где и происходит локальное разрушение. В общем случае коэффициент концентрации напряжений определяется отношением $K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$, где σ_{\max} – наибольшее местное напряжение, вызванное концентратором напряжений, а σ_n – номинальное напряжение, которое возникло бы в отсутствие концентратора напряжений (Хотт, 1978; Брок, 1980; Партон, Морозов, 1985). Максимальная концентрация напряжений в вершине трещины может превышать номинальное напряжение в десятки раз.

Подвод энергии к вершине трещины для ее роста и совершения работы по разрушению обеспечивается запасенной энергией упругой деформации W за счет нарастающей статической нагрузки (аэродинамическое давление). На увеличение трещины затрачивается энергия ΔG . Рост трещины приводит к уменьшению деформаций в зоне, прилегающей к трещине. В результате высвобождается энергия деформации – $\Delta W > 0$ (Партон, 1990). Если $-\Delta W > \Delta G$, то освободившейся энергии с избытком хватит на разрушение материала в вершине, и трещина будет самопроизвольно распространяться. При достижении критической величины аэродинамической нагрузки и почти мгновенном и одновременном самопроизвольном распространении многочисленных трещин и их слиянии избыточная запасенная энергия упру-

гой деформации, равная разности $-\Delta W - \Delta G > 0$, переходит в кинетическую. Ее будет все больше и больше ($-\Delta W$ растет пропорционально площади трещины). В результате происходит почти взрывообразное разрушение метеороида (реологический взрыв) (рис. 3б), сопровождаемое акустическим шумом или ударом (не путать с баллистической ударной волной). При каскадном разрушении все повторяется вновь и может наблюдаться несколько таких звуковых ударов. В случае, если $-\Delta W < \Delta G$, то освобожденной энергии будет недостаточно для увеличения длины трещины и она останется неподвижной.

На данный момент отсутствуют работы, содержащие анализ инструментальных акустических данных от пролета и разрушения крупных метеороидов. Анализ акустических данных от небольших метеороидов свидетельствует о том, что источником, прежде всего, является ударная волна от пролета. Поскольку ударная волна сама создает акустические возмущения, различить на этом фоне реологический взрыв представляется сложной задачей. Дополнительное энерговыделение от разрушений усложняет картину распределения давления на поверхности, но для точной идентификации (изменение давления в данной точке от времени, несколько пиков) нужен анализ инструментальных данных по скачкам давления в зоне прямого распространения волны (на расстояниях не превышающих 2–2.5 высот источника). Дополнительное энерговыделение при разрушении может увеличить скорости бокового разлета фрагментов. Эти скорости сейчас оцениваются как результат взаимодействия ударных волн фрагментов, а наблюдаемые величины их иногда превышают (Borovicka, Kalenda, 2003).

Период зарождения трещины или так называемый инкубационный период характеризуется постепенным появлением и накоплением микродефектов, размеры которых сравнимы с характерными размерами микроструктуры, т.е. с величиной минерального зерна. Микродефекты или микротрещины в горных породах и каменных метеоритах часто локализируются в зернах минералов и пересекают их и связаны либо с отдельностью в минералах с неясной или несовершенной спайностью (например, в оливине) или со спайностью в минералах с хорошей и совершенной спайностью (пироксены, плагиоклаз). Например, такие микродефекты отчетливо видны в зернах минералов обыкновенного хондрита MacAlpine Hills (Kimberley, Ramesh, 2011). Процесс рассеянного разрушения или накопления микродефектов происходит обычно на границе более крупных структурных элементов, т.е. в зоне, где физико-механические свойства структурного элемента,

соответствующего феноменологической модели однородной сплошной среды, плавно или резко изменяются. Инкубационный период заканчивается локализацией процесса рассеянного разрушения и образованием растущей начальной макротрещины.

Трещины, по которым происходит разрушение метеороида в верхней атмосфере Земли, это усталостные трещины, образовавшиеся в родительском теле в результате циклической и динамической ударной нагрузки, т.е. в результате предыдущей столкновительной эволюции. Циклическость заключается в том, что небольшая начальная трещина, однажды образовавшись, с каждым последующим столкновением или ударом будет подрастать (этап устойчивого развития трещины), пока не достигнет критической длины или площади для данного критического напряжения, после которого произойдет неконтролируемый и самопроизвольный рост трещины (этап неустойчивого развития). Скорость роста трещины на этапе неустойчивого развития может в 10^7 – 10^8 раз превышать скорость ее роста в начале (Партон, Морозов, 1985). Это конечная стадия, при которой происходит полное разрушение родительского тела. Следует отметить, что подавляющую часть жизни родительского тела занимает не инкубационный период зарождения макротрещины, а последующий период медленного квазистатического подрастания трещины от начального до критического размера. При этом механизм роста трещины не зависит от особенностей микроструктуры материала (Парис, Эрдоган, 1963).

Подобные усталостные трещины могут развиваться и в результате циклической приливной нагрузки при прохождении родительским или малым телом (кометные ядра, астероиды, малые силикатные и ледяные спутники) перицентра орбиты или вблизи более массивных (планетных) тел. Разрушение метеороида в атмосфере Земли происходит по трещинам, площадь которых равна или превышает критическую для данного размера тела, для данной прочности тела, и для данного критического напряжения (аэродинамического давления). Для каждого вновь образованного фрагмента в зависимости от его размера и прочности также, вероятно, существуют свои пределы критических размеров трещин при данной нагрузке. Это трещины, размеры которых в более крупном родительском теле были далеки от критических, но могли стать таковыми для более мелких фрагментов тела. Т.е. совершенно не обязательно, что все образовавшиеся в этом случае фрагменты будут прочнее предыдущего родительского тела, как это предполагается в соответствии с коэффициентом масштабности (Weibull, 1939). Подобное

последовательное дробление при меньших значениях аэродинамического давления наблюдалось, например, для фрагментов метеороида Moravka, которое происходило в интервале высот от 32.3 до 24 км при давлениях в диапазоне от 5 до 2.3 МПа (Borovicka, Kalenda, 2003).

Отделение первых фрагментов у каменных метеороидов наблюдается на высотах около 70–40 км и при аэродинамических нагрузках менее 1 МПа. Поскольку давление быстро возрастает, то уменьшается критический размер трещин и, соответственно, с уменьшением их размеров еще быстрее возрастает и количество таких дефектов. При наличии таких критических трещин будет развиваться каскадная фрагментация, ярким примером которой являются болиды Benesov (Borovicka и др., 1998a; 1998b) и Челябинский (Ророва и др., 2013). Чем меньше критических дефектов, тем крупнее и массивнее должен быть конечный фрагмент, как, например, в случае с болидом Carancas (Borovicka, Spurny, 2008; Kenkmann и др., 2009). В принципе, зная размеры тела до его дробления, его физико-механические свойства, величину и время нагрузки, можно оценить критические размеры трещин для данного тела, которые привели к его разрушению.

Как уже было отмечено выше, коэффициент масштабности α (формула 1), определяющий зависимость прочности от размеров объектов, для каменных метеороидов варьирует в крайне широком диапазоне. Соответственно, крайне широкий диапазон значений не позволяет его использовать в качестве универсального значения для каменных тел и получения какой-либо дополнительной неизвестной информации об объекте (прочности, составе, размерах, дефектности и предыдущей столкновительной истории). В этом плане коэффициент масштабности имеет больше философский смысл (больше размер – меньше прочность, но не всегда), чем физический. В отличие от коэффициента масштабности, предлагаемый автором коэффициент дефектности для оценки метеороидов на основе теории критического дефекта (критической длины или площади трещины), напротив, имеет определенный физический смысл и отражает конкретную, измеряемую и сравниваемую степень дефектности данного природного объекта в зависимости от его состава, прочности и предыдущей столкновительной истории. Если обозначить коэффициент дефектности, например, через k_l , то его безразмерная величина может быть выражена следующим простым отношением:

$$k_l = l_c / D_m,$$

где l_c – критическая длина трещины, D_m – средний диаметр метеороида. Или через критическую площадь трещины:

$$k_s = s_d / S_R,$$

где s_d – площадь критической трещины (дефекта) для данного каменного объекта; S_R – площадь поперечного сечения данного объекта в перерасчете на его средний радиус. Следует отметить, что если в механике разрушения критический размер трещины по сравнению с размером изделия и нагрузки – это обычный объект исследования и в теории и на практике, то в физике горных пород подобная предложенной оценке дефектности отдельного объекта автору не известна. По-видимому, это объясняется тем, что в отличие от метеороидов и их родительских тел, являющихся системами закрытыми, исследуемые горные породы, например, в геотектонике, это как правило, системы открытые, т.е. тесно взаимодействующие с другими объемами горных пород.

Метеороиды Carancas, Moravka, Park Forest, Peekskill, Pribram, St. Robert состоят из обычных хондритов, т.е. характеризуются тем же химическим и минеральным составом, близкими размерами и первичной массой. Тем не менее основное разрушение этих болидов происходило при очень разных нагрузках – от 0.5 до 18 МПа (табл. 7) вплоть до преодоления метеороидом Carancas максимальных нагрузок без разрушения. Очевидно, что и коэффициент дефектности этих объектов, который определяется, прежде всего, предыдущей столкновительной историей родительских тел и самих метеороидов, изначально обладающих примерно одинаковым химическим и минеральным составом и структурой, будет очень разным, и самым минимальным, т.е. близким к 0, он будет у метеороида Carancas. Учитывая, что коэффициент дефектности величина безразмерная, уже сейчас, ориентируясь на разрушающую нагрузку, можно выделить близкие по составу метеороиды с максимальным значением коэффициента, т.е. близким к единице. Метеороиды с найденными метеоритами – это Peekskill и Pribram (табл. 7). У метеороида Mason Gully коэффициент дефектности будет немного меньше. Среди болидов, принадлежащих к типу I (табл. 8), максимальный коэффициент дефектности и, соответственно, наиболее богатую столкновительную историю, имел Касов. А наименьшую дефектность в этой же группе имели Greenland и Turji-Remety.

Разработка удобной и относительно простой математической модели определения критической длины (площади) трещины для данного объекта с известной прочностью и размерами при данной величине нагрузки для количественной оценки и сравнения степени дефектности рассмотренных выше крупных каменных метеорои-

дов в зависимости от состава и других параметров является очередной задачей проводимых в настоящий момент исследований. Интересно было бы сравнить коэффициент дефектности с другими данными метеорита, от которых могла зависеть его предыдущая столкновительная история, например, с возрастом экспозиции объекта после того, как он покинул родительское тело, и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженная сильная анизотропия, достигающая более 60%, с одной стороны, объясняет значительные вариации прочностных свойств в образцах одного метеорита, с другой стороны, выдвигает совершенно новые требования как к методике проведения экспериментальных исследований физико-механических свойств метеоритов, так и к получаемым данным. Использование единичных измерений для сравнения физико-механических свойств метеоритов, например, разных петрологических типов, разных ударных фаций и с разной степенью выветривания возможно лишь с соответствующей оговоркой, поскольку единичное измерение в образце метеорита, характеризующегося анизотропией физико-механических свойств, может значительно отличаться от результата, полученного с учетом всех необходимых требований.

Следует отметить, что из-за малого количества опубликованных экспериментальных исследований физико-механических свойств внеземного вещества, многие из которых собраны в данной работе (физико-механические свойства железных метеоритов рассматриваются в работе (Слюта, 2013), а кометного вещества — в работе (Слюта, 2009)), а также и из-за постоянного совершенствования методики измерений, в настоящее время надежный сравнительный анализ прочностных свойств метеоритов различных типов пока невозможен. Единственным путем получения надежных данных по прочностным свойствам внеземного вещества остаются прямые экспериментальные и наблюдательные исследования.

Очевидно, что только дальнейший количественный анализ процесса накопления энергии упругой деформации и перехода ее в кинетическую поможет оценить пока не учитываемую дополнительную энергию эффекта “реологического взрыва” в акустический удар и на увеличение скорости бокового разлета фрагментов и сравнить теоретические данные с наблюдаемыми инструментальными данными. Интересной перспективной задачей является развитие аналитической модели предложенного коэффициента дефектности метеороидов, который, в отличие от

коэффициента масштабности, отражает конкретную, измеряемую и сравниваемую степень дефектности данного природного объекта в зависимости от его состава, прочности и предыдущей столкновительной истории (возраста образования, возраста экспозиции, степени метаморфизма, ударной фации и др.).

Разрушение каменных метеороидов, от отделения первых фрагментов до основного дробления и торможения, наблюдается в широком диапазоне аэродинамических нагрузок — от 0.1 до 18 МПа для обыкновенных хондритов и от 0.1 до 3 МПа для углистых хондритов. При этом максимальная величина нагрузки, при которой происходило разрушение, не превышала предела прочности на растяжение ни для обыкновенных хондритов (18–31 МПа), ни для углистых хондритов (6–12 МПа). Таким образом, предел прочности на растяжение в зависимости от состава метеороида, возможно, является верхним предельным значением, ограничивающим максимальную разрушающую аэродинамическую нагрузку для каменных метеороидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева К.Н.* Физические свойства каменных метеоритов и интерпретация их в свете гипотез о происхождении метеоритов // Метеоритика. 1958. Вып. 6. С. 67–77.
- Барсукова Л.Д., Харитонова В.Я., Банных Л.Н.* Химический состав метеорита Царев // Метеоритика. 1982. Вып. 41. С. 41–43.
- Брок Д.* Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
- Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова 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.
- Горшков Э.С.* Упругие свойства метеоритов // Метеоритика. 1973. Вып. 32. С. 126–135.
- Гораздовский Т.Я.* Динамика взрыва Тунгусского метеорита в свете эффектов лабораторного реологического взрыва // Вопросы метеоритики. Томск: изд. ТГУ, 1976. С. 74–82.
- Григорян С.С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17. Вып. 6. С. 875–893.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Зоткин И.Т., Цветков В.И.* Рассеяние каменного метеоритного дождя Царев // Метеоритика. 1984. Вып. 43. С. 3–8.

- Зоткин И.Т., Медведев Р.В., Горбачевич Ф.Ф.* Прочностные характеристики метеорита Царев // Метеоритика. 1987. Вып. 46. С. 86–93.
- Кринов Е.Л.* Основы метеоритики. М.: Гостехиздат, 1955. 392 с.
- Кринов Е.Л.* Морфология частей Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя / Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь Т. II / Ред. Фесенков В.Г. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 3–239.
- Левин Б.Ю.* Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе // М.: Изд-во АН СССР, 1956. 296 с.
- Медведев Р.В.* Статистическая интерпретация результатов прочностных испытаний горных пород // Физ.-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. 1974а. №4. С. 29–34.
- Медведев Р.В.* Определение механических и тепловых свойств метеоритов Кунашак и Еленовка // Метеоритика. 1974б. Вып. 33. С. 100–104.
- Медведев Р.В.* Состояние кристаллических горных пород в стенках глубоких и сверхглубоких скважин / Механика горных пород при подземном строительстве и освоении месторождений на больших глубинах. Л.: Наука, 1983. С. 128–134.
- Медведев Р.В., Горбачевич Ф.Ф., Зоткин И.Т.* Определение физических свойств каменных метеоритов применительно к изучению процессов их разрушения // Метеоритика. 1985. Вып. 44. С. 105–110.
- Немчинов И.В., Попова О.П.* Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. // Астрон. вестн. 1997. Т. 31, № 5. С. 458–471. (*Nemtchinov I.V., Popova O.P.* An analysis of the 1947 Sikhote-Alin event and a comparison with the phenomenon of February 1, 1994 // *Sol. Syst. Res.* 1997. V. 31. P. 408–420.)
- Парис П., Эрдоган Ф.* Критический анализ законов распространения трещин // Техническая механика. 1963. № 4. С. 60–68.
- Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.
- Партон В.З.* Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
- Породы горные. Методы физических испытаний. ГОСТ 21153.0-7521153.7-75. М.: Изд. Стандартов, 1975. 36 с.
- Протодьяконов М.М., Тедер Р.И., Ильницкая Е.И., Якобавили О.П., Сафронова И.Б., Цыкин А.И., Квашина О.И., Павлова Н.Н., Левушкин Л.Н., Зефиоров Ю.В., Савельев А.А., Долгова М.О.* Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие. М.: Недра, 1981. 192 с.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. Изд. 2-е. М.: Недра, 1973. 286 с.
- Слюта Е.Н.* Физико-механические свойства кометных ядер // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 5. С. 459–469. (*Slyuta E.N.* Physical-mechanical properties of a cometary nucleus // *Sol. Syst. Res.* 2009. V. 43. № 5. P. 443–452.)
- Слюта Е.Н.* Физико-механические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 2. С. 122–140. (*Slyuta E.N.* Physicomechanical properties and gravitational deformation of metallic asteroids // *Sol. Syst. Res.* 2013. V. 47. № 2. P. 109–126.)
- Слюта Е.Н.* Форма малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 3. С. 234–256. (*Slyuta E.N.* Shape of small Solar system bodies // *Sol. Syst. Res.* 2014. V. 48. № 3. P. 217–238.)
- Справочник (Кадастр) физических свойств горных пород / Ред. Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протодьяконов М.М. М.: Недра, 1975. 280 с.
- Турчанинов И.Л., Медведев Р.В., Панин В.И.* Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. Л.: Недра, 1967. 200 с.
- Фадеев Ю.И.* Разрушение метеорных тел в атмосфере // Физика горения и взрыва. 1967. № 2. С. 276–280.
- Хотт Дж.Ф.* Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
- Цветков В.И., Скрипник А.Я.* Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. № 3. С. 364–371. (*Tsvetkov V.I., Skripnik A.Ya.* Atmospheric fragmentation of meteorites according to the strength theory // *Sol. Syst. Res.* 1991. V. 25. № 3. P. 273–279.)
- Явнель А.А.* Механические свойства Сихотэ-Алинского метеорита // Сихотэ-Алинский метеоритный дождь. Т. 2. М.: АН СССР, 1963. С. 362–371.
- Anders E.* How well do we know “Cosmic” abundances? // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1971. V. 35. P. 516–522.
- Bischoff A., Zipfel J.* Mineralogy of the Neuschwanstein (EL6) chondrite – first results // 34th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2003. Abstract #1212.
- Bischoff A., Jersek M., Grau T., Mirtic B., Ott U., Kučera J., Horstmann M., Laubenstein M., Herrmann S., Randa Z., Weber M., Heusser G.* Jesenice – A new meteorite fall from Slovenia // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 793–804.
- Bischoff A., Dyl K.A., Horstmann M., Ziegler K., Wimmer K., Young E.D.* Reclassification of Villalbeto de la Peña—Occurrence of a winonaite-related fragment in a hydrothermally metamorphosed polymict L-chondritic breccia // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2013. V. 48. P. 628–640.
- Bland P.A., Spurny P., Towner M.C., Bevan A.W.R., Singleton A.T., Bottke W.F., Greenwood R. C., Chesley S.R., Shrubeny L., Borovicka J., Ceplecha Z., McClafferty T.P., Vaughan D., Benedix G.K., Deacon G., Howard K.T., Franchi I.A., Hough R.M.* A anomalous basaltic meteorite from the innermost Main Belt // *Science.* 2009. V. 325. P. 1525–1527.
- Borovicka J.* The analysis of casual video records of fireballs // Proc. Int. Meteor. Conf., Poznań, Poland, 2013 / Eds Gyssens M., Roggemans P., Żołądek P. 2014. P. 101–105.

- Borovička J., Spurný P.* Radiation study of two very bright terrestrial bolides and an application to the comet S-L 9 collision with Jupiter // *Icarus*. 1996. V. 121. P. 484–510.
- Borovička J., Popova O.P., Nemtchinov I.V., Spurný P., Ceplecha Z.* Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: Comparison of theory and observations. I. Benešov bolide dynamics and fragmentation // *Astron. and Astrophys.* 1998a. V. 334. P. 713–728.
- Borovička J., Popova O.P., Golub A.P., Kosarev I.B., Nemtchinov I.V.* Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: comparison of theory with observations II. Benešov bolide spectra // *Astron. and Astrophys.* 1998b. V. 337. P. 591–602.
- Borovička J., Kalenda P.* The Morávka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2003. V. 38. P. 1023–1043.
- Borovička J., Spurný P., Kalenda P., Tagliaferri E.* The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2003a. V. 38. P. 975–987.
- Borovička J., Weber H.W., Jopek T., Jakeö P., Randa Z., Brown P.G., ReVelle D.O., Kalenda P., Schultz L., Kucera J., Haloda J., Tycová P., Fryda J., Brandstätter F.* The Morávka meteorite fall. 3. Meteoroid initial size, history, structure, and composition // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2003b. V. 38. P. 1005–1021.
- Borovička J., Spurný P.* The Caranacas meteorite impact - encounter with a monolithic meteoroid // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 485. P. L1–L4.
- Borovička J., Charvát Z.* Meteoroid observation of the atmospheric entry of 2008 TC3 over Sudan and the associated dust cloud // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 507. P. 1015–1022.
- Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Shrbený L.* The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // *Nature*. 2013a. V. 503. P. 235–237.
- Borovička J., Tóth J., Igaz A., Spurný P., Kalenda P., Haloda J., Svoreň J., Kornoš L., Silber E., Brown P., Husárik M.* The Košice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2013b. V. 48. P. 1757–1779.
- Borovička J., Spurný P., Brown P.* Small Near-Earth asteroids as a source of meteorites // *Asteroids IV* / Eds Michel P., DeMeo F.E., Bottke Jr.W.F. Univ. Arizona Press, 2015. P. 257–280.
- Britt D.T., Yeomans D., Housen K., Consolmagno G.* Asteroid density, porosity and structure // *Asteroids III* / Eds Bottke V.F., Celino A., Paolicchi P.P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 485–500.
- Brown P.G., Ceplecha Z., Hawkes R.L., Wetherill G.W., Beech M., Mossman K.* The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records // *Nature*. 1994. V. 367. P. 624–626.
- Brown P., Hildebrand A.R., Green D.W.E., Page' D., Jacobs C., ReVelle D., Tagliaferri E., Wacker J., Wetmiller B.* The fall of the St-Robert meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.* 1996. V. 31. P. 502–517.
- Brown P.G., Hildebrand A.R., Zolensky M.E., Grady M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Tagliaferri E., Spalding R., MacRae N.D., Hoffman E.L., Mittlefehldt D.W., Wacker J.F., Bird J.A., Campbell M.D., Carpenter R., Gingerich H., Glatiotis M., Greiner E., Mazur M.J., McCausland P.J.A., Plotkin H., Mazur T.R.* The fall, recovery, orbit, and composition of the Tagish Lake meteorite: A new type of carbonaceous chondrite // *Science*. 2000. V. 290. P. 320–325.
- Brown P.G., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Hildebrand A.R.* An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2002. V. 37. P. 661–675.
- Brown P.G., Pack D., Edwards W.N., ReVelle D.O., Yoo B.B., Spalding R.E., Tagliaferri E.* The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2004. V. 39. P. 1781–1796.
- Brown P., McCausland P.J.A., Fries M., Silber E., Edwards W.N., Wong D.K., Weryk R.J., Fries J., Krzeminski Z.* The fall of the Grimsby meteorite—I: Fireball dynamics and orbit from radar, video, and infrasound records // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 339–363.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., de Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D.E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R.E., Spurný P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R.J., Whitaker R., Krzeminski Z.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013a. V. 503. P. 238–241.
- Brown P., Marchenko V., Moser D.E., Weryk R., Cooke W.* Meteorites from meteor showers: A case study of the Taurids // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2013b. V. 48. P. 270–288.
- Ceplecha Z.* Multiple fall of Příbram meteorites photographed. 1. Double-station photographs of the fireball and their relations to the found meteorites // *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*. 1961. V. 12. P. 21–47.
- Ceplecha Z.* Earth's influx of different populations of sporadic meteoroids from photographic and television data // *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*. 1988. V. 39. P. 221–236.
- Ceplecha Z.* Meteoroid Properties from Photographic Records of Meteors and Fireballs // *Proc. 160th Int. Astron. Union Symp.: Asteroid, Comets, Meteors 1993*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 1994. P. 343–356.
- Ceplecha Z.* Luminous efficiency based on photographic observations of the Lost City fireball and implications for the influx of interplanetary bodies onto Earth // *Astron. and Astrophys.* 1996. V. 311. P. 329–332.
- Ceplecha Z., McCrosky R.E.* Fireball end heights – A diagnostic for the structure of meteoric material // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 6257–6275.
- Ceplecha Z., Brown P.G., Hawkes R.L., Wetherill G.W., Beech M., Mossman K.* Video observations, atmospheric path, orbit and fragmentation record of the fall of the

- Peekskill meteorite // *Earth, Moon and Planets*. 1996. V. 72. P. 395–404.
- Cepilecha Z., Borovicka J., Elford W.G., ReVelle D.O., Hawkes R.L., Porubckan V., Simek M.* Meteor phenomena and bodies // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 84. P. 327–471.
- Cepilecha Z., ReVelle D.O.* Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2005. V. 40. P. 35–54.
- Connolly H.C., Smith C., Benedix G., Folco L., Zipfel J., Yamaguchi A., Chennaoui A.H.* The Meteoritical Bulletin, № 93 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2008. V. 43. P. 571–632.
- Dodd R.T.* Preferred orientation of chondrules in chondrites // *Icarus*. 1965. V. 4. P. 308–316.
- Dodd R.T.* Meteorites: A petrologic-chemical synthesis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981. 368 p.
- Endress M., Zinner E.K., Bischoff A.* Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies // *Nature*. 1996. V. 379. P. 701–703.
- Grady M.M.* Ghubara. Catalogue of Meteorites. London: Cambridge Univ. Press, 2000. P. 214.
- Haack H., Grau T., Bischoff A., Horstmann M., Wasson J., Sorensen A., Laubenstein M., Ott U., Palme H., Gellissen M., Greenwood R.C., Pearson V.K., Franchi I.A., Gabelica Z., Schmitt-kopplin P.* Maribo – new CM fall from Denmark // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2012. V. 47. № 1. P. 30–50.
- Halliday I., Blackwell A.T., Griffin A.A.* The Innisfree meteorite and the Canadian camera network // *J. Roy. Astron. Soc. Canada*. 1978. V. 72. P. 15–39.
- Halliday I., Griffin A., Blackwell A.T.* The Innisfree meteorite fall – A photographic analysis of fragmentation, dynamics and luminosity // *Meteoritics*. 1981. V. 16. P. 153–170.
- Heyse J.V.* The metamorphic history of LL-group ordinary chondrites // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1978. V. 40. P. 365–381.
- Hildebrand A.R., Brown P., Crawford D., Boslough M., Chael E., Revelle D., Doser D., Tagliaferri E., Rathbun D., Cooke D., Adcock C., Karner J.* The El Paso Superbolide of October 9, 1997 // 30th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1999. Abstract #1525.
- Hildebrand A.R., McCausland P.J.A., Brown P.G., Longstaffe F.J., Russell S.D.J., Tagliaferri E., Wacker J.F., Mazur M.J.* The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2006. V. 41. P. 407–431.
- Hildebrand A.R., Milley E.P., Brown P.G., McCausland P.J.A., Edwards W., Beech M., Ling A., Sarty G., Paulson M.D., Maillet L.A., Jones S.F., Stauffer M.R.* Characteristics of a bright fireball and meteorite fall at Buzzard Coulee, Saskatchewan, Canada, November 20, 2008 // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston. 2009. Abstract #2505.
- Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D., Elsir S., Kudoda A.M., Zolensky M.E., Le L., Robinson G.A., Friedrich J.M., Rumble D., Steele A., Chesley S.R., Fitzsimmons A., Duddy S., Hsieh H.H., Ramsay G., Brown P.G., Edwards W.N., Tagliaferri E., Boslough M.B., Spalding R.E., Dantowitz R., Kozubal M., Pravec P., Borovicka J., Charvat Z., Vaubailon J., Kuiper J., Albers J., Bishop J.L., Mancinelli R.L., Sandford S.A., Milam S.N., Nuevo M., Worden S.P.* The impact and recovery of asteroid 2008 TC₃ // *Nature*. 2009. V. 458. P. 485–488.
- Jenniskens P., Fries M. D., Yin Q., Zolensky M., Krot A. N., Sandford S.A., Sears D., Beauford R., Ebel D.S., Friedrich J.M., Nagashima K., Wimpenny J., Yamakawa A., Nishiizumi K., Hamajima Y., Caffee M.W., Welten K.C., Laubenstein M., Davis A.M., Simon S.B., Heck P.R., Young E.D., Kohl I.E., Thiemens M.H., Nunn M.H., Mikouchi T., Hagiya K., Ohsumi K., Cahill T.A., Lawton J.A., Barnes D., Steele A., Rochette P., Verosub K.L., Gattaccecchia J., Cooper G., Glavin D.P., Burton A.S., Dworkin J.P., Elsila J.E., Pizzarello S., Oglione R., Schmitt-Kopplin P., Harir M., Hertkorn N., Verchovsky A., Grady M., Nagao K., Okazaki R., Takechi H., Hiroi T., Smith K., Silber E.A., Brown P.G., Albers J., Klotz D., Hankey M., Matson R., Fries J.A., Walker R.J., Puchtel I., Lee C.T.A., Erdman M.E., Eppich G.R., Roeske S., Gabelica Z., Lerche M., Nuevo M., Girten B., Worden S.P. (the Sutter's Mill Meteorite Consortium).* Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia // *Science*. 2012. V. 338. P. 1583–1587.
- Jenniskens P., Rubin A.E., Yin Q.Z., Sears D.W.G., Sandford S.A., Zolensky M.E., Krot A.N., Blair L., Kane D., Utas J., Verish R., Friedrich J.M., Wimpenny J., Eppich G.R., Ziegler K., Verosub K.L., Rowland D.J., Albers J., Gural P.S., Grigsby B., Fries M.D., Matson R., Johnston M., Silber E., Brown P., Yamakawa A., Sanborn M.E., Laubenstein M., Welten K.C., Nishiizumi K., Meier M.M.M., Busemann H., Clay P., Caffee M.W., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Glavin D.P., Callahan M.P., Dworkin J.P., Wu Q., Zare R.N., Grady M., Verchovsky S., Emel'Yanenko V., Naroenkov S., Clark D.L., Girten B., Worden P.S., and The Novato Meteorite Consortium.* Fall, recovery and characterization of the Novato L6 chondrite breccia // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2014. V. 49. P. 1388–1425.
- Kenkmann T., Artemieva N.A., Wunnemann K., Poelchau M.H., Elbeshausen D., Nunes del Prado H.* The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic surveying and modeling of crater formation and atmospheric passage // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2009. V. 44. P. 985–1000.
- Kimberly J., Ramesh K.T.* The dynamic strength of an ordinary chondrite // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. № 11. P. 1653–1669.
- Korochantsev A. V., Sadilenko A., Ivanova M. A., Lorentz C.A., Zabalueva E.V.* A study of the fragment dispersal and trajectory of the Sayh al Ahaymir 001 meteorite shower // 66th An. Meteoritical Soc. Meeting, 2003. Abstr. #5049.
- Krot A.N., Keil K., Goodrich C.A., Scott E.R.D., Weisberg M.K.* Classification of meteorites // *Treatise on geochemistry / Eds Davis A.M., Holland H.D., Turekian K.K.* Elsevier Pergamon Press, 2003. P. 83–128.
- Llorca J., Trigo-Rodríguez J.M., Ortiz J.L., Docobo J.A., García-Guinea J., Castro-Tirado A.J., Rubin A.E., Eugster O., Edwards W., Laubenstein M., Casanova I.* The Villalbeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy,

- meteorite recovery, strewn field, and petrography // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2005. V. 40. P. 795–804.
- McCrosky R.E., Posen A., Schwartz G., Shao C.Y. Lost City meteorites, its recovery and a comparison with other fireballs // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 4090–4108.
- Milley E.P. Physical properties of fireball-producing Earth-impacting meteoroids and orbit determination through shadow calibration of the Buzzard Coulee meteorite fall // MSc. Thesis, Calgary: Univ. Calgary, 2010. 166 p.
- Miura Y.N., Noguchi T., Tsuchiyama A., Yano H., Yoshida S., Nagata K. Compressive strength measurements of meteorites and terrestrial rocks: Implications for physical properties of asteroidal surfaces // Japan Geoscience Inion Meeting, 2008. Abstr. #P168-P002.
- Nemtchinov I.V., Kuzmicheva M.Yu., Shuvalov V.V., Golub A.P., Popova O.P., Kosarev I.B., Borovicka J. Sumava meteoroid -Was it a small comet? / Evolution and source regions of asteroids and comets. Proc. IAU Colloq.173 / Eds Svoren J., Pittich E.M., Rickman H. Tatranska Lomnica. Astron. Inst. Slovak Acad. Sci. 1999. P. 51–56.
- Nicolas A. Principles of Rock Deformation. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, Holland, 1987. 168 p.
- Pedersen H., Spalding R.E., Tagliaferri E., Ceplecha Z., Risbo T., Haack H. Greenland superbolide event of 1997 December 9, 2001 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2001. V. 36. P. 549–558.
- Popova O., Borovicka J., Hartmann W.K., Spurny P., Gnos E., Nemtchinov I., Trigo-Rodriguez J.M. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 1525–1550.
- Popova O., Jeyyiskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.H., Li Q.L., Liu Y., Tang G.Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T., (the Chelyabinsk Airburst Consortium). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science.* 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- ReVelle D.O., Brown P.G., Spurny P. Entry dynamic and acoustic / infrasonic / seismic analysis for the Neuschwanstein meteorite fall // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2004. V. 39. P. 1605–1626.
- Rubin A.E., Keil K., Scott E.R.D. Shock metamorphism of enstatite chondrites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. P. 847–858.
- Scott E.R.D., Keil K., Stoffler D. Shock metamorphism of carbonaceous chondrites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1992. V. 56. P. 4281–4293.
- Segon D., Korlević K., Andreić Ž., Kac J., Atanackov J., Kladnik G. Meteorite-dropping bolide over north Croatia on 4th February 2011 // WGN, J. Int. Meteor. Org. 2011. V. 39. P. 98–99.
- Slyuta E.N., Voropaev S.A. Gravitational deformation in shaping asteroids and small satellites // *Icarus.* 1997. V. 129. P. 401–414.
- Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A. Physical and mechanical properties of Sayh Al Uhaymir 001 and Ghubara meteorites // 39th Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston, 2008. Abstr. #1056.
- Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A., Skripnik A.Ya. Strong physical and mechanical anisotropy of ordinary chondrites // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston, 2009, Abstract #1051.
- Spurny P., Heinlein D., Oberst J. The atmospheric trajectory and heliocentric orbit of the Neuschwanstein meteorite fall on April 6, 2002 // Proc. Conf. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002) / Ed. Warmbein B. ESA SP-500. Noordwijk: European Space Research and Technology Center, 2002. P. 137–140.
- Spurny P., Oberst J., Heinlein D. Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Příbram chondrite // *Nature.* 2003. V. 423. P. 151–153.
- Spurny P., Bland P. A., Borovicka J., Shrbeny L., McClafferty T., Singelton A., Bevan A.W. R., Vaughan D., Towner M.C., Deacon G. The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: Determination of the fireball trajectory, luminosity and impact position from photographic records // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2009. Abstract #1498.
- Spurny P., Borovicka J., Kac J., Kalenda P., Atanackov J., Kladnik G., Heinlein D., Grau T. Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2010. V. 45. P. 1392–1407.
- Spurny P., Bland P. A., Shrbeny L., Borovicka J., Ceplecha Z., Singelton A., Bevan A. W. R., Vaughan D., Towner M. C., McClafferty T. P., Toumi R., Deacon G. The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: Fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit, and impact position from photographic and photoelectric records // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2012a. V. 47. P. 163–185.
- Spurny P., Bland P.A., Borovicka J., Towner M.C., Shrbeny L., Bevan A.W.R., Vaughan D. The Mason Gully meteorite fall in SW Australia: Fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit and impact position from photographic records // Asteroids, Comets, Meteors Conf. Niigata, Japan, 2012b. Abstr. #6369.
- Spurny P., Haloda J., Borovicka J., Shrbeny L., Halodová P. Reanalysis of the Benešov bolide and recovery of inhomogeneous breccia meteorites – old mystery revealed after 20 years // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 570. A39. P. 1–14.
- Stoffler D., Keil K., Scott E. R. D. Shock metamorphism in ordinary chondrites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1991. V. 55. P. 3845–3867.

- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V.* Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131–153.
- Tancredi G., Ishitsuka J., Schultz P.H., Harris R.S., Brown P., Revelle D.O., Antier K., Le Pichon A., Rosales D., Vidal E., Varela M.E., Sánchez L., Benavente S., Bojorquez J., Cabezas D., Dalmaua A.* A meteorite crater on Earth formed on September 15, 2007: The Carancas hypervelocity impact // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2009. V. 44. P. 1967–1984.
- Towner M.C., Bland P.A., Spurny P., Benedix G.K., Dyl K., Greenwood R.C., Gibson J., Franchi I.A., Shrubny L., Bevan A.W.R., Vaughan D.* Mason Gully: the second meteorite recovered by the Desert Fireball Network // 74th Ann. Meteorit. Soc. Meeting. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. A238. Abstr. № 5124.
- Trigo-Rodríguez J.M., Borovička J., Spurny P., Ortiz J.L., Docobo J.A., Castro-Tirado A.J., Llorca J.* The Villalberto de la Peña meteorite fall: II. Determination of atmospheric trajectory and orbit // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2006. V. 41. P. 505–517.
- Tsuchiyama A., Mashio E., Imai Y., Noguchi T., Miura Y.N., Yano H.* Strength measurements of carbonaceous chondrites and cosmic dust analogs using micro compression testing machine // Japan Geosience Union Meeting, 2008. Abstr. #P168–P002.
- Tsuchiyama A., Mashio E., Imai Y., Noguchi T., Miura Y., Yano H., Nakamura T.* Strength measurement of carbonaceous chondrites and micrometeorites using micro compression testing machine // 72nd Ann. Meteorit. Soc. Meeting. *Meteorit. Soc. Meeting. Meteoritics and Planet. Sci.* 2009. V. 44. A206. Abstr. № 5189.
- Weibull W.A.* A statistical theory of the strength of materials // *Proc. Roy Swedish Inst. Engineering Res.* 1939. № 151. 45 p.
- Weibull W.A.* A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* 1951. V. 18. P. 293–297.
- Wlotzka F.* A weathering scale for the ordinary chondrites // *Meteoritics*. 1993. V. 28. P. 460.