

К ВОПРОСУ О ВЕЩЕСТВЕ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

© 2007 г. О. Г. Гладышева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 31.10.2006 г.

Приводится приблизительный состав остатков Тунгусского метеорита, полученный путем усреднения результатов нескольких измерений. Отмечается, что вещество остатков космического тела было обогащено щелочными и щелочноземельными элементами. Отмечена крайняя неоднородность состава вещества метеорита. Определен верхний предел плотности Тунгусского космического тела, равный 2.8 г/см^3 . Предлагается считать, что в результате взаимодействия с атмосферой Земли космическое тело распалось на частицы размером от 10^{-7} до 10^{-3} м, причем большая часть вещества оказалась вынесена в верхние слои атмосферы. Расчеты скорости и времени оседания частиц в атмосфере показали, что за изменение прозрачности атмосферы ответственны частицы радиусом $>10^{-5}$ м.

PACS: 96.30. Ys

ВВЕДЕНИЕ

Для создания теории, касающейся явлений, наблюдавшихся во время Тунгусской катастрофы, нам необходимо знать хотя бы приблизительный состав вещества космического тела, его плотность и распределение частиц, на которые раздробилось тело в результате взрыва. Изучением вещества, составлявшего Тунгусский метеорит, занималось много исследователей. Основные результаты изложены в работах Флоренского (1963), Флоренского и др. (1968а; 1968б), Долгова и др. (1973), Алексеевой и др. (1976), Колесникова и др. (1976; 1977), Kolesnikov и др. (1999; 2003), Голенецкого и др. (1977а; 1977б; 1981), Собоновича и др. (1983), Колесникова (1984), Львова (1984), Vasilyev (1998) и т.д.

После взрывного разрушения в воздухе Тунгусского метеорита поверхности земли достигли лишь отдельные сильно раздробленные и обгоревшие мельчайшие его фрагменты. Основную часть найденных остатков вещества космического тела составляют силикатные и магнетитовые шарики размерами в доли миллиметра, обнаруженные в почве района катастрофы (Флоренский и др., 1968б; Кирова, 1961; Кирова, Заславская, 1966). Эти частицы несут на себе следы высокотемпературного воздействия, то есть космическое тело не только раздробилось на мельчайшие кусочки, но эти кусочки успели оплавиться. Обнаружили, что остатки вещества космического тела рассыпаны на значительной территории, причем количество шариков на единицу поверхности на расстоянии в 400 км от эпицентра такое же, как и в ближней зоне (Флоренский и др., 1968а). Прослеживается шлейф повышенного содержания остатков космического тела в северо-западном направлении. Это свидетельствует о том, что значительная часть

вещества взорвавшегося тела оказалась поднятой в воздух и медленно оседала по мере перемещения пылевого облака.

Более мелкие частицы, размерами от 0.5 до 50.0 мкм были выделены из смолы ветвей деревьев, переживших катастрофу вблизи эпицентра взрыва (Longo и др., 1994; Alekseev, 1998). Продолжая расти после катастрофы, деревья как бы “законсервировали” частицы, попавшие на них во время взрыва. С помощью годичных колец удается определить древесные слои, существовавшие к моменту катастрофы, и выделить частицы космического тела среди остальных фоновых частиц. Отмечается, что частицы, относящиеся к Тунгусскому метеориту, могут быть округлыми, т.е. подвергшимися нагреву и плавлению, а могут иметь рваные или клочковатые края, причем среди последних встречаются как металлические (Alekseev, 1998), так и неметаллические (Longo и др., 1994).

Еще одним природным архивом, содержащим информацию о составе Тунгусского космического тела, является сфагновый торф верховых болот (Голенецкий и др., 1977а; Львов, 1984). Исследование торфа существенно отличается от исследования почвы, в которой отбирались силикатные и магнетитовые шарики. Если шарики, аналогичные тем, что были обнаружены на месте катастрофы, встречаются в почвах других районов Земли, как продукты сгорания в атмосфере метеоритов, и их связь именно с Тунгусским событием не очевидна (Назаров и др., 1990), то торфяники являются идеальным накопителем опустившейся на земную поверхность пыли. Еще одним преимуществом торфяников является то, что растущий мох получает питательные вещества исключительно из атмосферы, поэтому он не загрязняется грун-

товыми водами. Поскольку мох нарастает слоями, в торфе можно уверенно выделить слой, содержащий годовой прирост мха за 1908 г., тем более, если горизонт торфяной залежи хорошо стратифицирован повышенной зольностью из-за общего ожога мха в момент катастрофы.

Измерений поэлементного состава остатков метеорита не много, тем не менее целью настоящей работы было восстановление приблизительного состава вещества Тунгусского метеорита путем усреднения содержания элементов в силикатной и магнетитовой фракции и определения доли этих составляющих в общем составе вещества. Кроме этого, на основе анализа перемещения пылевых частиц, выброшенных в результате катастрофы в верхние слои атмосферы, планировалось получить распределение остатков Тунгусского метеорита по размерам.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСТАТКОВ МЕТЕОРИТА

Химический состав остатков Тунгусского метеорита определялся несколькими группами ученых. Усредненные результаты по содержанию элементов в магнетитовых и силикатных шариках, а также в тяжелых микрочастицах приведены в таблице.

Методом рентгеноспектрального микроанализа, позволяющем выполнить измерения в разных частях среза образцов, определили содержание Fe, Ni и Co в магнетитовых шариках (Флоренский и др., 1968). Оказалось, что содержание Ni и Fe испытывает значительные вариации от точки к точке, что связано с обогащением и обеднением ядер магнетитовых шариков этими элементами по отношению к оболочке. В связи с этим среднее содержание Fe, Ni и Co в магнетитовых шариках приводится по концентрациям, измеренным в шариках, не содержащих ядер.

Исследование элементов, составлявших силикатные шарики, проводили три группы ученых разными методами. Одни из них использовали рентгеноспектральный анализатор (микрозонд) (Glass, 1969; Долгов и др., 1973), а другие применили метод нейтроноактивации (Колесников и др., 1976). Если анализ с помощью микрозонда позволял изучать состав только отдельных крупных шариков, то нейтронно-активационный метод давал среднее содержание элементов десятков и сотен шариков.

Химический состав частиц, обнаруженных в смоле деревьев, определялся с использованием сканирующего электронного микроскопа и X-лучевого спектрометра (Longo и др., 1994). Исследовались лишь тяжелые частицы, то есть такие, которые содержат главным образом элементы тяжелее Ti. В таблице приводится содержание

Весовое содержание основных компонент в остатках Тунгусского метеорита

Вид остатков	Силикатные частицы	Тяжелые частицы	Магнетитовые частицы	Итого
Компонента	Средняя величина (количество измерений)	Средняя величина (из 463 измерений)	Средняя величина (количество измерений)	Средняя величина
Na	4 (9)	—	—	3
Mg	2 (7)	—	—	1
Al	8 (9)	9	—	8
Si	28 (7)	4	—	20
S	—	3	—	1
K	2 (7)	—	—	1
Ca	8 (7)	6	—	7
Ti	0.3 (7)	2	—	1
Cr	—	4	—	1
Mn	0.3 (9)	—	—	—
Fe	2 (9)	17	67 (4)	8
Ni	—	2	5 (4)	1
Co	—	—	0.4 (4)	—
Cu	—	13	—	4
Zn	—	6	—	2
Ba	—	6	—	2
Au	—	19	—	5

элементов, усредненное по измерениям 463 тяжелых частиц. Количество легких частиц (содержащих Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca и Fe) в слое, относящемся к Тунгусскому событию, оказалось лишь на треть больше фона. Поскольку отделение нужных частиц от фоновых не представлялось возможным, их измерения не обобщались.

Для того, чтобы приблизительно определить химический состав остатков Тунгусского метеорита, необходимо знать соотношение количества силикатной и магнетитовой компоненты. Согласно результатам поиска микросферул в районе Тунгус-

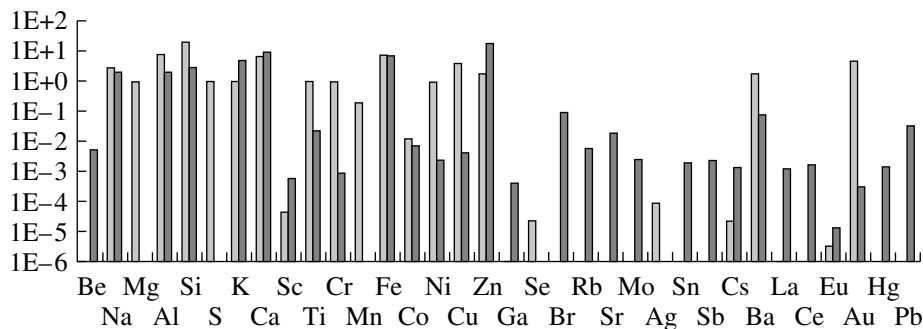


Рис. 1. Химический состав остатков Тунгусского метеорита. Светлые столбики – концентрации, полученные по усреднению состава силикатных и магнетитовых шариков, а также микрочастиц, темные столбики – химический состав, определенный по избытку элементов в торфяных слоях (Голенецкий и др., 1977а).

ской катастрофы на одну–две тысячи магнетитовых шариков было обнаружено лишь несколько десятков силикатных шариков (Кирова, Заславская, 1966). Эти величины не отражают истинного состояния дел, поскольку отбор магнетитовых шариков облегчали магниты, в то время как силикатные шарики приходилось искать только визуально. Для определения вышеупомянутого соотношения будем использовать результаты работы Longo и др. (1994). Соотношение легких и тяжелых частиц (без учета их веса) для периода, относящегося ко времени Тунгусской катастрофы, определим исходя из среднего количества тех и других частиц на единице поверхности, при этом среднее количество фоновых частиц вычтем.

Таким образом, для расчетов принимаем, что на 130 легких частиц приходится около 60 тяжелых частиц. Сделаем еще одно допущение: примем, что химический состав легких частиц сопоставим с составом силикатных микросферул. Кроме этого, поскольку в работе (Longo и др., 1994) отмечено, что из 518 тяжелых частиц 471 содержит некоторый процент легких элементов, в расчетах примем, что только 1/10 часть тяжелых частиц имеет химический состав, аналогичный магнетитовым шарикам. В результате среднее содержание отдельного химического элемента C в составе остатков Тунгусского метеорита будем оценивать по формуле

$$C = 0.68C_s + 0.32(0.9C_h + 0.1C_m),$$

где C_s – средняя концентрация этого элемента в силикатных шариках, C_h – в тяжелых частицах и C_m – в магнетитовых шариках.

Приблизительный состав вещества остатков Тунгусского метеорита, полученный на основе усреднения магнетитовых и силикатных шариков, а также микрочастиц смолы ветвей деревьев, можно сравнить с составом Тунгусского метеорита, определенным на основе анализа зольного вещества слоев торфяной залежи, соответствующих времени катастрофы. В определении химических

элементов Голенецкий и др. (1977а) использовали следующие методы: нейтронно-активационный, рентгеноспектральный и оптической спектроскопии. На рис. 1 приводятся как результаты расчета состава Тунгусского метеорита, полученные методом усреднения (концентрации основных элементов приведены в таблице), так и результаты восстановления состава метеорита по анализу содержания элементов в торфяных образцах.

Следует сразу отметить, что, хотя в методе усреднения использовано несколько допущений, полученный результат в общих чертах неплохо согласуется с тем, что было выявлено на основе измерений торфяной компоненты. Следовательно, результат усреднения можно считать грубым приближением истинного состава остатков Тунгусского метеорита.

Отметим следующие особенности состава Тунгусского космического тела.

1. Вещество значительно обогащено щелочными и щелочноземельными элементами, их содержание сопоставимо с содержанием железа. Голенецкий и др. (1977а) даже полагают, что содержание Na колеблется в диапазоне от 2% до 60%, а содержание Ca может превышать 10% (на рис. 1 приведены нижние границы концентраций).

2. В свою очередь, вещество метеорита оказалось обедненным железом, никелем и кобальтом. Их содержание в остатках Тунгусского космического тела много ниже, чем в любых других типах метеоритов и космической распространенностью данных элементов. Можно предположить, что в методике расчетов средней величины коэффициент, учитывающий вклад магнетитовых шариков, был занижен, однако Голенецкий с соавторами (1977а) также отмечают, что содержание этих элементов в торфяных образцах оказалось чрезвычайно низким.

3. Среднее содержание Au, определенное в работе (Longo и др., 1994) кажется завышенным, однако следует отметить, что в составе Тунгусского метеорита тяжелые элементы, такие, как Ba, Au,

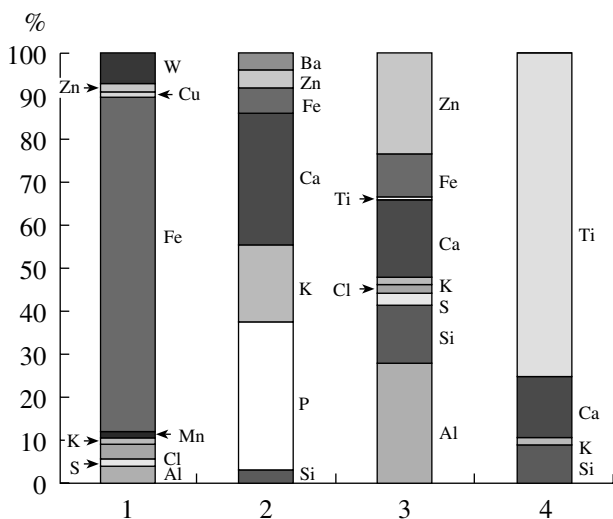


Рис. 2. Химический состав четырех тяжелых микро-частиц (элементы с атомным номером $Z \leq 10$ не учитывались). Процентное соотношение элементов взято из работы (Longo и др., 1994).

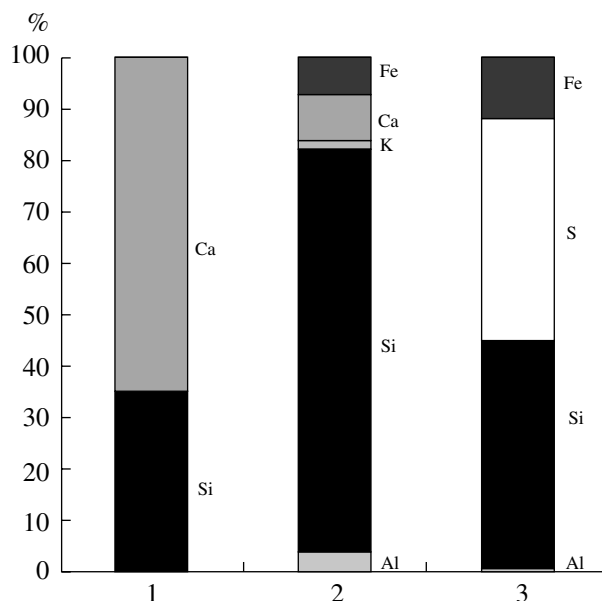


Рис. 3. Химический состав силикатных частиц. 1–2 – легкие частицы (Longo и др.), 3 – микровключения алмаз-графитовых сростков (Соботович и др., 1983).

Hg и Pb, обнаружены в количествах, на несколько порядков превышающих космическую распространенность этих элементов.

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СОСТАВА

Следует отметить, что вещество остатков Тунгусского метеорита очень неоднородно. Одни образцы содержат более чем 20% Zn, другие – столько же Al. В некоторых образцах содержание Ca, S, P по отдельности превышает 30%. А некоторые фрагменты являются чисто-металлическими, причем не в смеси, а каждый металл отдельно. В отдельно взятой частице может содержаться от 75% до 90% Ti или Fe, или Cu, или Ni (Longo и др., 1994; Соботович и др., 1983; Флоренский и др., 1968а). Если аномально высокие концентрации Fe и Ni в отдельных образцах магнетитовых шариков, содержащих металлические ядра, еще можно объяснить особенностями диффузии в расплавах, то колебания в концентрациях других элементов свидетельствуют о сильной неоднородности исходного вещества. На рис. 2 и 3 приводится химический состав отдельных частиц, обнаруженных в районе Тунгусской катастрофы. Видно, что ни о каком подобии состава не может быть и речи.

ИСХОДНЫЙ СОСТАВ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

После приблизительного расчета содержания элементов в остатках Тунгусского метеорита (таблица) удалось определить только 65% его весовых частей, остальные 35% приходятся глав-

ным образом на кислород, поскольку значительная часть вещества в остатках Тунгусского метеорита находится в виде окислов SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O (Долгов и др., 1973; Glass, 1969). Не факт, что весь этот кислород метеорного происхождения, он вполне мог оказаться атмосферным и попал в остатки метеорита в результате процесса горения.

В исходном веществе Тунгусского космического тела было несравненно больше, чем приводится в таблице, серы, а также находились в значительном количестве углерод, водород и азот. Это заключение базируется на следующих фактах.

1. В пузырьках силикатных шариков были обнаружены газы H_2 , CO_2 , CO (Долгов и др., 1973; Колесников и др., 1976) и H_2S , NH_3 , SO_2 (Долгов и др., 1973), которые имели не атмосферное происхождение.

2. Еще Астапович (1951) обратил внимание на одну особенность, отмеченную на месте катастрофы: “эвенки упоминали о серном запахе в районе падения”. Хорошо известно, что сера входит в состав метеоритов, причем наибольшее ее количество отмечается в углистых метеоритах, и классический углистый хондрит Мигеи в 1889 г. обнаружили именно по серному запаху.

3. В слое торфа, относящемся к году Тунгусской катастрофы, обнаружили алмаз-графитовые сростки (Соботович и др., 1983). Рентгенограммы исследованных зерен, имевших в поперечнике размер от 0.2 до 0.8 мм, показали следующее соотношение минералов: алмаз \geq графит > лонсдейлит > > троилит.

4. Львов (1984) обратил внимание на то, что в районе Тунгусской катастрофы осело значительное количество углерода предположительно космического происхождения, возрастом более 60000 лет. Если учесть, что для углерода период полураспада 5730 лет, то эта величина превышает предел чувствительности метода (10 периодов полураспада), следовательно, углерод мог иметь значительно больший возраст, равный, например, возрасту метеоритов. Наличие в слое торфа, соответствующем 1908 г., значительного количества углерода, имеющего внеземное происхождение, подтверждается работами Колесникова (1984) и Rasmussen и др., (1999; 2001).

5. Изотопные исследования азота и водорода в торфяниках вблизи эпицентра взрыва (Kolesnikov и др., 1998; 1999; 2003) также показали существенное отличие изотопного соотношения элементов, находящихся в слое 1908 г., как от других слоев торфяной залежи, так и от среднего изотопного соотношения в других земных образцах. Этот факт также свидетельствует о привносе азота и водорода извне.

Кроме вышеперечисленных элементов, в состав метеорита входили Be, P, Cl, Sc, Ga, Se, Br, Rb, Sr, Y, Mo, Pd, Rh, Ru, Ag, Sn, Sb, Cs, La, Ce, Eu, Yb, W, Hg, Pb и т.д. Одни из этих элементов были обнаружены в микрочастицах (Longo и др., 1994), а другие – в торфяных отложениях, причем их концентрации превышали фоновый уровень (Колесников и др., 1976; Журавлев, Демин, 1976, Голенецкий и др., 1977а, б; Колесников, 1984; Ноу и др., 2004)

Не касаясь в этой статье спора о кометной (Whipple, 1930; Fesenkov, 1969; Голенецкий и др., 1977а; Колесников и др., 1977; Колесников, 1984; Bronshten, 1999; Ноу, 2004) или метеоритной (Кринов, 1952; Соботович и др., 1983; Longo и др., 1994) природе Тунгусского космического тела, можно сделать предварительное заключение, что вещество Тунгусского метеорита по своим свойствам близко как к углисту метеориту класса CI, так и к комете, по современным представлениям об этом небесном объекте (Mumma и др., 2005; Harker и др., 2005; Küppers и др., 2005; A'Neag и др., 2005).

Плотность вещества остатков Тунгусского метеорита можно приблизительно оценить, исходя из плотности силикатных и магнетитовых шариков. Плотность силикатных шариков меняется от 1.9 г/см³ (Колесников и др., 1976) до 2.4 г/см³ (Кирова, 1961), а магнетитовых – от 4.0 г/см³ (Флоренский и др., 1968б) до 4.5 г/см³ (Кирова, 1961). Используя упоминавшееся выше соотношение между количеством легких и тяжелых частиц в остатках Тунгусского метеорита, получаем приблизительно плотность остатков космического тела, равной 2.8 г/см³. Учитывая, что значитель-

ная часть легких элементов выгорела, эту величину можно принять за верхний предел плотности самого Тунгусского метеорита.

РАСПЫЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА МЕТЕОРИТА

Поскольку попытки обнаружения крупных осколков метеорита вблизи эпицентра ни к чему не привели, приходится признать, что в момент взрыва (или взрывов) вся масса метеорита развалилась на более или менее крупные осколки, которые продолжали дробиться, пока не перешли в мелкодисперсное состояние. Значительная часть вещества Тунгусского метеорита была вынесена в верхние слои атмосферы. Фесенков (1949) отметил, что запылению подверглась атмосфера по всей ее толщине, от самых низких слоев до высоты ~80 км, следовательно, резонно считать, что в результате Тунгусской катастрофы вещество космического тела было выброшено на эту высоту.

Высказывалось предположение, что запыленность атмосферы связана не с Тунгусской катастрофой, а с проникновением пыли в атмосферу из космоса. Это опровергается следующими фактами.

Во-первых, согласно каталогам наблюдений очевидцев, составленным Вознесенским (1925) и Коненкиным (1967), в 47% случаев местные жители отметили появление дыма над тем местом, где летящий объект скрылся за горизонтом. Поскольку дым наблюдали жители населенных пунктов, достаточно удаленных от места катастрофы, то можно оценить высоту выброса остатков Тунгусского тела как 90 км. Механизм выноса частиц на столь большую высоту предлагается в работе автора (Гладышева, 2005).

Во-вторых, пыль в разные области земной атмосферы попала в разное время. Тунгусская катастрофа произошла утром 30 июня 1908 г., а кратковременное довольно сильное понижение прозрачности атмосферы наблюдалось в Париже 4–6 июля 1908 г. (Васильев и др., 1965), в то время как весьма заметное понижение прозрачности было зафиксировано в обсерватории Маунт-Вилсон в Калифорнии со второй половины июля 1908 г. Здесь уменьшение прозрачности отмечалось почти месяц (Turco и др., 1982). Таким образом, получается, что пыль в атмосфере над Европой появилась по прошествии считанных дней после катастрофы, в то время как в Калифорнии – спустя две недели. Если бы пыль была от внешнего источника, например, хвоста кометы, – помутнение возникло бы одновременно и совпало бы с днем катастрофы.

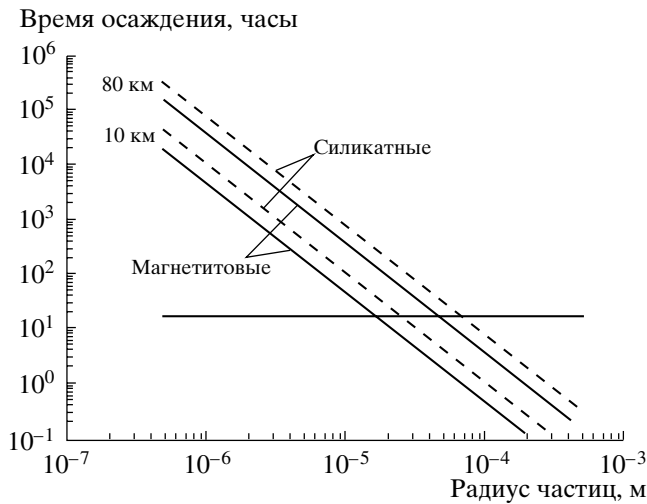


Рис. 4. Время осаждения частиц с высоты 10 и 80 км на поверхность земли в зависимости от их размера и плотности. Горизонтальная линия соответствует времени выноса пылевого облака за пределы исследовавшейся территории.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА ПО РАЗМЕРАМ

Скорость оседания частиц, выброшенных в верхние слои атмосферы, можно определить следующим образом. Частица падает вниз под действием силы тяжести P .

$$P = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g,$$

где R – радиус частицы, ρ – ее плотность, g – ускорение свободного падения, зависящее от высоты. Сила сопротивления воздуха F направлена противоположно силе тяжести и равна

$$F = 6\pi R\eta V,$$

где η – зависящий от высоты коэффициент, определяющий вязкость воздуха, V – скорость частицы. Скорость равномерного движения частицы определяется из условия $P = F$. Отсюда

$$V = \frac{2\rho g R^2}{9\eta}.$$

Поскольку вязкость атмосферного воздуха зависит от многих параметров, в том числе и от температуры, скорость осаждения частиц меняется с высотой. Оценим время осаждения частиц с высоты 80 км и 10 км (рис. 4). Расчеты выполнены для частиц с плотностью 2 г/см³ (силикатные) и 4.5 г/см³ (магнетитовые) и размерами от 1 мкм до 1 мм.

При определении распределения частиц, оставшихся после распыления Тунгусского метеорита, пробы отбирались на расстоянии, не превышающем 400 км от эпицентра. Обычно за среднюю

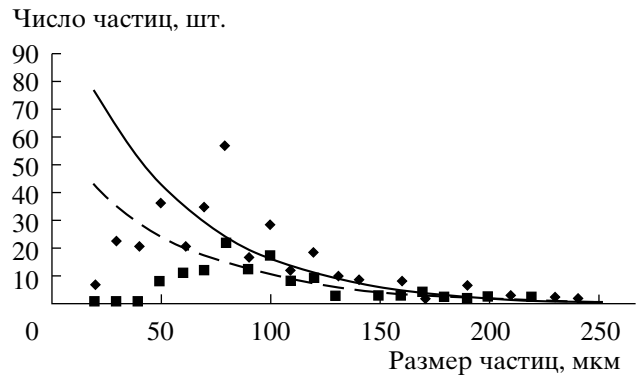


Рис. 5. Распределение магнетитовых (черные ромбики) и силикатных (серые квадраты) частиц по размерам. Точки – экспериментальные данные из работы Кировой (1961), сплошные линии – аппроксимационные кривые.

скорость ветра принимается величина 24 км/ч. Следовательно, в пробы могли попасть только те частицы, которые успели выпасть за то время, пока облако частиц от метеорита не было унесено за границы исследовавшейся территории (на рис. 4 это время отмечено горизонтальной линией). Таким образом, получается, что в пределах 400 км зоны на землю выпали только наиболее крупные частицы. С высоты 80 км выпали частицы размером (диаметром) более сотни микрон, а с высоты 10 км – несколько десятков микрон. Более мелким частицам (размером 10 мкм) потребуется несколько недель для того, чтобы опуститься с высоты 80 км на поверхность земли, а микронного размера частицы останутся в атмосфере на годы.

Приблизительное распределение частиц, образовавшихся в результате Тунгусской катастрофы, по размерам можно представить на основе распределения силикатных и магнетитовых сферул, обнаруженных вблизи эпицентра. Экспериментальные данные по количеству найденных в эпицентре магнетитовых частиц, взятые из работы Кировой (1961), приведены на рис. 5 в виде точек. С учетом того, что значительная часть частиц была вынесена из исследуемой области, можно построить линии тренда для магнетитовых частиц, размером более 50 мкм (сплошная линия) и силикатных частиц размером более 70 мкм (пунктир). Очевидно, что количество частиц, выброшенных в атмосферу в результате взрыва, могло как по количеству, так и по массе многократно превышать то, что осталось вблизи эпицентра. Это согласуется с тем, что общее количество вещества, осевшего на площади вокруг эпицентра взрыва, ученые оценили в несколько тонн (Флоренский, 1963; Бояркина и др., 1976), в то время как помутнение атмосферы было вызвано распылением вещества массой по крайней мере в несколько миллионов тонн (Фесенков, 1949).

Можно оценить размеры частиц, которые повлияли на уменьшение прозрачности атмосферы в Калифорнии. Там атмосфера оставалась запыленной 1.5 месяца после Тунгусской катастрофы. Если предположить, что частицы из атмосферы выпали на землю, а не были снесены воздушными потоками, зная изменение скорости оседания частиц с высотой и пренебрегая восходящими течениями, получаем, что поверхности земли за это время достигли частицы радиусом больше чем 10^{-5} м.

Другая оценка размера частиц, выброшенных в атмосферу, была получена из наблюдений за оседанием пыли, с которой был связан аномальный ход кривой для точки Араго (Васильев и др., 1965). Измерения и расчеты средней скорости оседания пыли дали величину 0.62 км/сут, что близко к скорости оседания частиц окиси железа радиусом 10^{-5} м.

Таким образом, получается неплохое согласие двух независимых оценок и можно считать, что за изменение свойств атмосферы ответственны частицы радиусом 10^{-5} м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, проанализировав все известные данные по измерению состава остатков Тунгусского метеорита, можно сделать следующие выводы. Вещество Тунгусского метеорита было очень гетерогенно по составу, оно представляло собой некую субстанцию, обогащенную летучими и легкоплавкими элементами, в то время как тугоплавкие компоненты входили в него в меньшем количестве и в виде крайне неоднородных металлических зерен.

Изменение прозрачности атмосферы, отмечавшееся в Европе и Америке, было связано с взрывом Тунгусского метеорита, в результате которого космическое тело распалось на частицы размером от 10^{-7} до 10^{-3} м, причем большая часть вещества оказалась вынесена в верхние слои атмосферы.

Автор выражает признательность рецензенту, а также кандидатам физ.-мат. наук Г.А. Ковальцову и И.С. Лизунковой за полезные замечания и помощь в доработке этой статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева К.Н., Смирнова А.В., Васильев Н.В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва // *Космическое вещество на Земле* / Ред. Соболев В.С. и др. Новосибирск: Наука, 1976. С. 19–23.

Астапович И.С. Большой тунгусский метеорит. Результаты исследований // *Природа*. 1951. № 3. С. 13–23.

Бояркина А.П., Васильев Н.В., Менявцева Т.А. и др. К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва // *Космическое вещество на*

Земле / Ред. Соболев В.С. и др. Новосибирск: Наука, 1976. С. 8–15.

Васильев Н.В., Журавлев В.К., Журавлева Р.К. и др. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М.: Наука, 1965. 112 с.

Вознесенский А.В. Падение метеорита 30 июня 1908 г. в верховьях р. Хатанги // *Мироведение*. 1925. Т. 14. № 1. С. 25–38.

Гладышева О.Г. Тунгусская катастрофа: источник излучения // *Препр. ФТИ*. 2005. № 1787. 30 с.

Голенецкий С.П., Степанок В.В., Колесников Е.М., Мурашов Д.А. К вопросу о химическом составе и природе Тунгусского космического тела // *Астрон. вестн.* 1977а. Т. 11. № 3. С. 126–136.

Голенецкий С.П., Степанок В.В., Колесников Е.М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г. // *Геохимия*. 1977б. № 11. С. 1635–1645.

Голенецкий С.П., Малахов С.Г., Степанок В.В. К вопросу о природе глобальных атмосферных аэрозолей // *Астрон. вестн.* 1981. Т. 15. № 4. С. 226–233.

Долгов Ю.А., Васильев Н.В., Шугурова Н.А. и др. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1973. № 32. С. 147–149.

Журавлев В.К., Демин Д.В. К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита // *Космическое вещество на Земле* / Ред. Соболев В.С. и др. Новосибирск: Наука, 1976. С. 99–104.

Кирова О.А. О минералогическом изучении проб почв из района падения Тунгусского метеорита, собранных экспедицией 1958 г. // *Метеоритика*. 1961. № 20. С. 32–39.

Кирова О.А., Заславская Н.И. Некоторые данные о распыленном веществе из района падения Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1966. № 27. С. 119–127.

Колесников Е.М., Люль А.Ю., Иванова Г.М. Нейтроноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита // *Космическое вещество на Земле* / Ред. Соболев В.С. и др. Новосибирск: Наука, 1976. С. 87–98.

Колесников Е.М., Люль А.Ю., Иванова Г.М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г. // *Астрон. вестн.* 1977. Т. 11. № 4. С. 209–218.

Колесников Е.М. Изотопные аномалии в торфе с места падения Тунгусского метеорита // *Метеоритные исследования в Сибири* / Ред. Долгов Ю.А. Новосибирск: Наука, 1984. С. 49–63.

Коненкин В.Г. Сообщения очевидцев о Тунгусском метеорите 1908 года // *Проблема Тунгусского метеорита*. Вып. 2. Изд. Томского ун-та. 1967. С. 31–35.

Кринов Е.Л. Гигантские метеориты. М.: Изд. АН СССР, 1952. 96 с.

Львов Ю.А. Углерод в составе Тунгусского метеорита // *Метеоритные исследования в Сибири (75 лет Тунгусскому феномену)* / Ред. Васильев Н.В. Новосибирск: Наука, 1984. 218 с.

- Назаров М.А., Корина М.И., Барсукова Л.Д. и др. Вещественные следы Тунгусского болида // Геохимия. 1990. № 5. С. 627–639.
- Соботович Э.В., Квасница В.Н., Ковалюх Н.Н. Новое свидетельство вещественности Тунгусского тела // Метеоритные и метеорные исследования / Ред. Долгов Ю.А. и др. Новосибирск: Наука, 1983. С. 138–140.
- Фесенков В.Г. Помутнение атмосферы, произведенное падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. // Метеоритика. 1949. № 6. С. 8–12.
- Флоренский К.П. Предварительные результаты Тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 года // Метеоритика 1963. № 23. С. 3–29.
- Флоренский К.П., Иванов А.В., Ильин Н.П. и др. Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел // Геохимия. 1968а. № 10. С. 1163–1173.
- Флоренский К.П., Иванов А.В., Кирова О.А. и др. Фазовый состав мелкодисперсного внеземного вещества из района Тунгусской катастрофы // Геохимия. 1968б. № 10. С. 1174–1182.
- A' Hearn M.F., Belton M.J.S., Delamere W.A., et al. Deep impact: Excavating comet Tempel 1 // Science. 2005. V. 310 (5746). P. 258–264.
- Alekseev V.A. New aspects of the Tunguska meteorite problem // Planet. and Space Sci. 1998. V. 46 (2/3). P. 169–177.
- Bronshten V.A. The nature of the Tunguska meteorite // Meteoritics and Planet. Sci. 1999. V. 34. P. 723–728.
- Fesenkov V.G. Nature of comets and the Tunguska phenomenon // Solar Syst. Res. 1969. V. 3. P. 177–179.
- Glass B.P. Silicate spherules from Tunguska impact area: electron microprobe analysis // Science. 1969. V. 164 (3879). P. 547–549.
- Harker D.E., Woodward C.E., Wooden D.H. The dust grains from 9P/Tempel 1 before and after the encounter with deep impact // Science. 2005. V. 310. P. 278–280.
- Hou Q.L., Kolesnikov E.M., Xie L.W., et al. Platinum group element abundances in a peat layer associated with the Tunguska event, further evidence for a cosmic origin // Planet. and Space Sci. 2004. V. 52. P. 331–340.
- Kolesnikov E.M., Kolesnikova N.V., Boettger T. Isotopic anomaly in peat nitrogen is a probable trace of acid rains caused by 1908 Tunguska bolide // Planet. and Space Sci. 1998. V. 46 (2/3). P. 163–167.
- Kolesnikov E.M., Boettger T., Kolesnikova N.M. Finding of probable Tunguska Cosmic Body material: isotopic anomalies of carbon and hydrogen in peat // Planet. and Space Science. 1999. V. 47 (6–7). P. 905–916.
- Kolesnikov, E.M., Longo G., Boettger, T., et al. Isotopic-geochemical study of nitrogen and carbon in peat from the Tunguska Cosmic Body explosion site // Icarus. 2003. V. 161. P. 235–243.
- Küppers M., Bertini I., Fornaisier S., et al. A large dust/ice ratio in the nucleus of comet 9P/Tempel 1 // Nature. 2005. V. 437. P. 987–990.
- Longo G., Serra R., Cecchini S., Galli M. Search for microremnants of the Tunguska cosmic body // Planet. and Space Sci. 1994. V. 42 (2). P. 163–177.
- Mumma M.J., DiSanti M.A., Magee-Sauer K., et al. Parent volatiles in comet 9P/Tempel 1: Before and after impact // Science. 2005. V. 310 (5746). P. 270–274.
- Rasmussen K.L., Olsen H.J.F., Gwozdz R., Kolesnikov E.M. Evidence for a very high carbon/iridium ratio in the Tunguska impactor // Meteoritics and Planet. Sci. 1999. V. 34. P. 891–895.
- Rasmussen K.L., Olsen H.J.F., Gwozdz R., Kolesnikov E.M. More on CO₂/Iridium ratio in the Tunguska impactor // Meteoritics and Planet. Sci. 2001. V. 36 (7). P. 1001–1006.
- Turco R.P., Toon O.B., Park C., et al. An analysis of the physical, chemical, optical and historical impacts of the 1908 Tunguska meteor fall // Icarus. 1982. V. 50. P. 1–52.
- Vasilyev N.V. The Tunguska meteorite problem today // Planet. and Space Sci. 1998. V. 46 (2/3). P. 129–150.
- Whipple F.J.W. The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced // Quarterly J. Roy. Meteorological Soc. 1930. V. 56 (236). P. 287–301.