

Изучение Челябинского метеорита

М.Я. Маров

*Институт геохимии и аналитической химии им.
В.И. Вернадского РАН*

День космической науки

4 октября 2013 г.

Институт космических исследований РАН

Содержание

- Введение.
- Наблюдательные данные
- Оценки энерговыделения и высоты взрыва по данным наблюдений
- Аэродинамика входа. Основные эффекты и модельные оценки
- Эффекты в верхней атмосфере и ионосфере
- Результаты космохимических исследований
- Проблема астероидно-кометной опасности, методы и средства противодействия
- Заключение



Введение

- **Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г - рядовое астрономическое явление, но самое крупное за последние 100 лет - привлекло к себе большое внимание, так как его падение произошло в довольно густо населенном районе и сопровождалось целым рядом зрелищных эффектов и разрушений.**
- **Этот фрагмент более крупного тела принес важную научную информацию о составе вещества, из которого сложены небесные тела Солнечной системы, пополнив обширные коллекции метеоритов различных петрологических классов.**
- **Их детальное изучение имеет ключевое значение для ответа на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением и ранней эволюцией Солнечной системы.**
- **Челябинское событие - уникально, поскольку впервые столкновение с крупным небесным телом было детально задокументировано.**
- **Данное событие имеет важное значение с точки зрения оценки астероидно-кометной опасности (АКО), поиска средств и методов противодействия.**
- **Предварительные результаты исследований опубликованы в специальных тематических номерах журналов «Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы» и «Геохимия».**

Сценарии входа и разрушения

- При падении космического тела на Землю реализуется один из четырех сценариев (Шувалов и Трубецкая, 2005):
 - кратерообразующий удар, когда тело достигает поверхности Земли;
 - воздушный болид, когда продукты полностью разрушенного и испаренного метеороида тормозятся в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметные разрушения и пожары;
 - поверхностный болид (“метеорный взрыв”), когда высокоскоростная струя, состоящая из мелких фрагментов и паров метеороида и нагретого в ударной волне воздуха, ударяет по поверхности Земли, не образуя кратера;
 - обыкновенные метеорные явления, не оставляющие следов на поверхности Земли.
- При **кратерообразующих ударах** ударные волны генерируются при пролете тела через атмосферу, при выбросе вещества из кратера и при последующем падении продуктов выбросов.
- Типичный пример **воздушного метеорного взрыва** – Тунгусское событие (образуются падающая на землю и отраженные ударные волны).
- При **разрушении в атмосфере** метеороид распадается на отдельные фрагменты, с их частичным испарением за счет излучения воздуха, нагретого в ударной волне.
- **Совокупность фрагментов** под действием давления за фронтом ударной волны увеличивает с площадью поперечного сечения, что приводит к быстрому торможению и сильному энерговыделению.

Болидные события

- Падение на Землю метеороидов, подобных Челябинскому событию, не очень редкое явление.
- Чем **крупнее** тело тем **глубже** оно проникает в атмосферу, дробится на более мелкие осколки.
- Тела размером порядка **10 м** начинают разрушаться на высотах **40-50 км** и тормозятся на **20-30 км** . Часть фрагментов может сохраниться и выпасть на поверхность Земли, как это произошло в случае Челябинского болида **15 февраля 2013 года**.

Подобные события:

- Болиды 3.08.1963 года (район островов Принца Эдуарда, Южная Африка) оценка энергии 260 Кт ТНТ;
- Болид Маршаловых островов (1.02.1994), оценка энергии 40 Кт ТНТ;
- Индонезийский болид (8.10.2009) , оценка энергии 50 Кт ТНТ.
- Последний раз похожее явление на территории России - 2002 г. (Витимский болид 24.09.2002, энергия ~ 10 Кт ТНТ).
- Однако впервые Челябинское событие детально задокументировано.

Наземные регистрации и оценки энергосыделения.

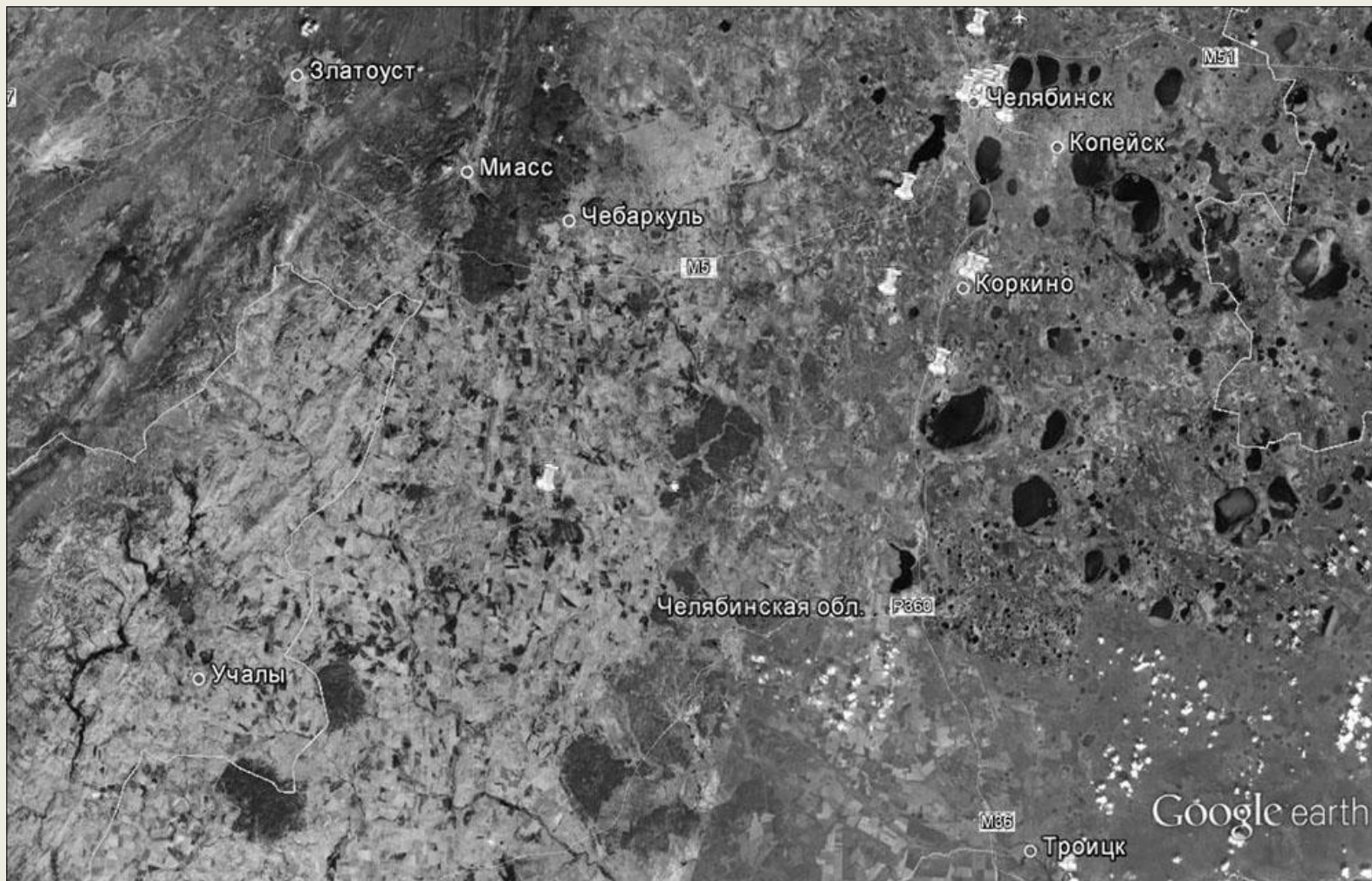
Наблюдательные данные

- Событие: 15.02.2013, 9:20 местного времени , район г. Челябинска .
- Вход в атмосферу Земли под углом 20° к горизонту, размер 16-19 м со стороны Солнца, не был замечен средствами космического и наземного наблюдения за естественными и искусственными небесными телами.
- Значительный рост яркости, максимальная вспышка в момент взрыва через 11-12 секунд после появления метеороида (до -17 зв. величины) .
- Вычисленные координаты места максимальной яркости (54.8N, 61.1E) находятся на траектории Челябинского метеороида; соответствующие высота и скорость на этот момент 23.3 км и 18.6 км/с.
- Через несколько минут (от 77 секунд до трех минут по данным многочисленных видео-регистраций , в зависимости от расстояния, пришла ударная волна.
- На большой территории было найдено множество мелких (не более 2 см) фрагментов тела – метеоритов, долетевших до поверхности земли, но размеры отдельных были больше и их вес достигал 3 кг.
- Большая часть фрагментов имеет хондритовую структуру, содержащую до 60% хондр неправильной формы со средним размером около 1 мм в матрице из обломков хондр и минеральных зерен.

Фотография одного из фрагментов метеорита Челябинск



Места видеозаписей моментов вспышки и прихода ударной волны (площадь около 8000 кв. км, 135 км С-Ю от Челябинска до Троицка и 85 км З-В от п. Мирный до Троицка)



Примеры видеорегистраций



02 / 15 / 2013 09 : 23 : 38

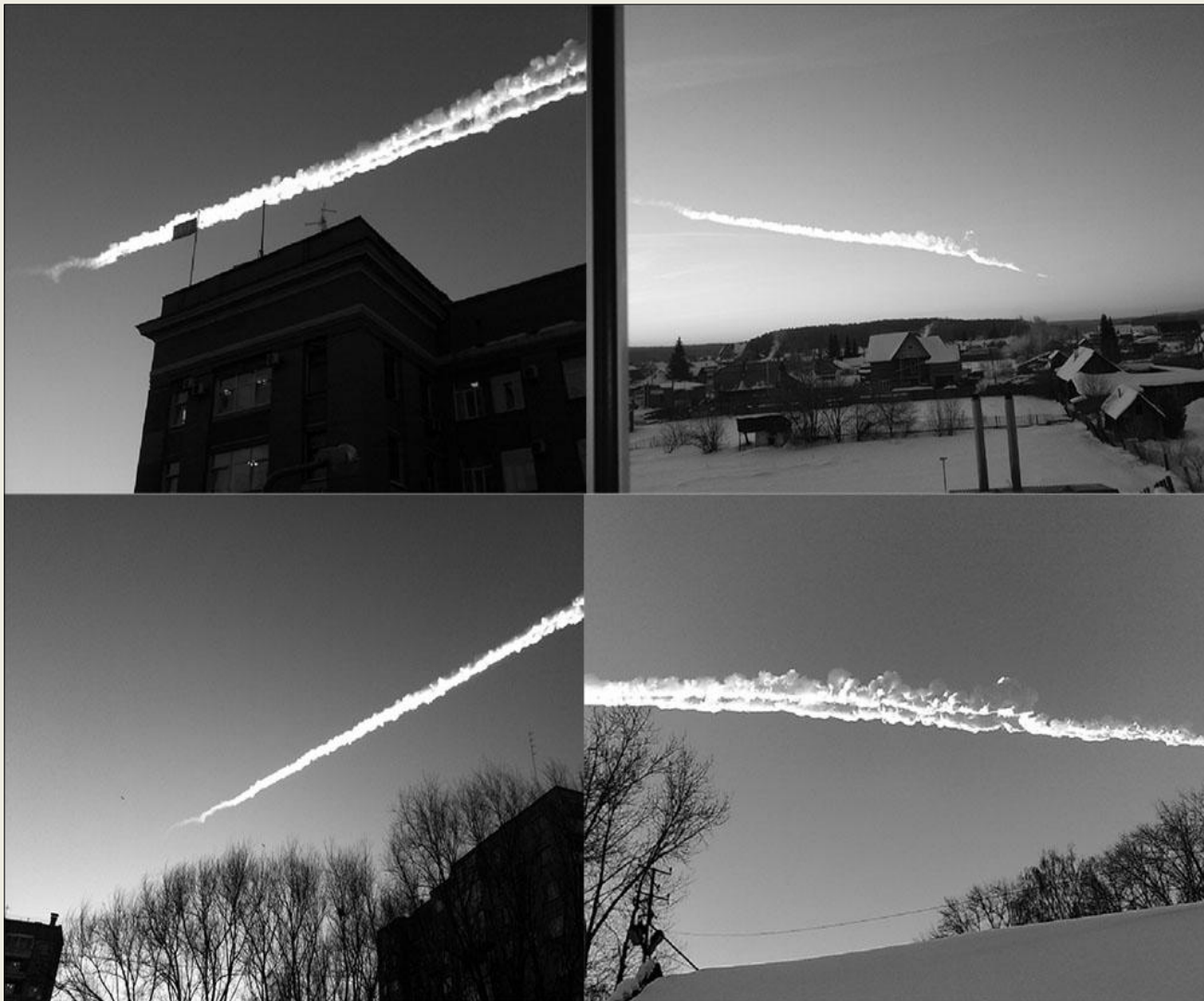


- Места, откуда были сделаны видеозаписи, запечатлевшие полет тела.

- По сообщениям очевидцев, свечение от вспышки было ярче солнечного, ощущался жар; до и после вспышки на небе был хорошо виден след от болида.

Кадры видеорегистраций полета тела

Фотографии инверсионного следа (1)



Фотографии инверсионного следа.

Фотографии инверсионного следа (2).

Разрушения



- По данным МЧС, самые большие разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и 10 районах области (Коркино, Копейск, поселок Роза и др.).

За медицинской помощью обратились более 1500 человек, около 100 чел. госпитализировано, двое - в реанимацию.

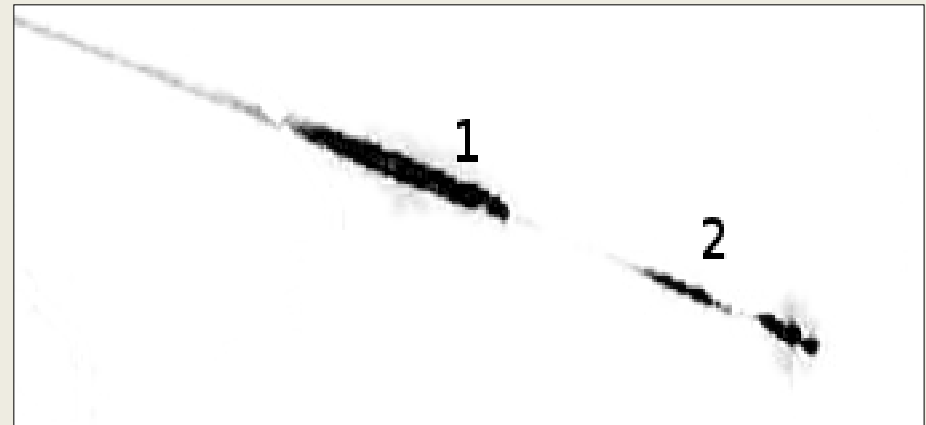
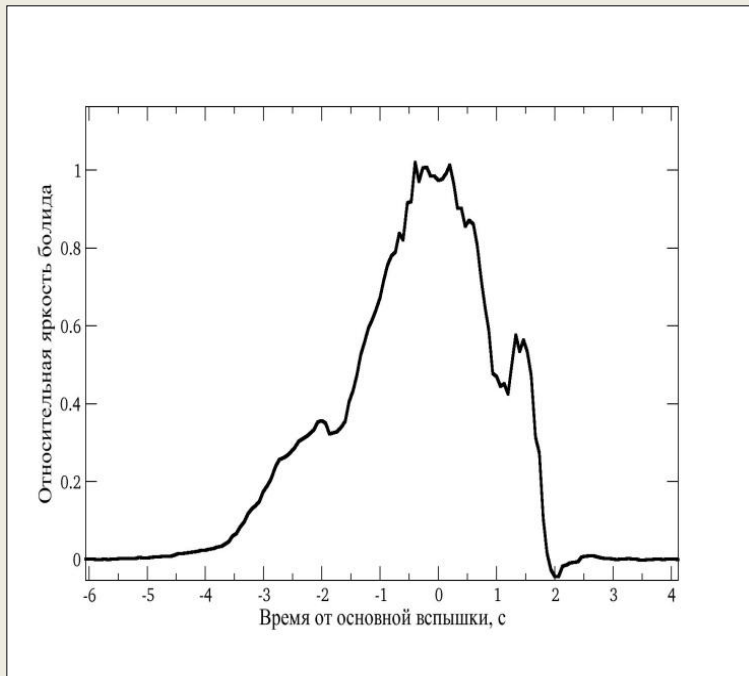
- Большинство пострадало от выбитых стёкол.
- По числу пострадавших падение этого метеорита не имеет аналогов.

Высота вспышки и вертикальный дрейф

- По видеорегистрациям были определены высота вспышки и скорость вертикального дрейфа облака.
- Главных источник ошибок определения высоты вспышки - неточное определение горизонта на снимке.
- Скорость вертикального дрейфа $V \sim 110-120$ м/с в течение первых 100 секунд, затем верхняя точка облака двигалась с $V < 10$ м/с.
- Первые 10 секунд расширение следа было \sim осесимметричным, к 20-й секунде стал заметен вертикальный подъем облака от основного взрыва.
- Скорости вертикального смещения типичны для конвективных скоростей раскаленных облаков после атомного взрыва.
- Объем облака, образовавшегося при главной вспышке, ~ 1000 км³ и нагрев такой массы газа составляет десятки градусов.
- Это также сравнимо энергией, выделяемой при взрыве атомной бомбы: при росте стратосферной высоты на 12-13 километров температура атмосферы увеличивается на 20 градусов (Шувалов и др., 2013).

Фотометрия вспышки болида

- Кривая блеска болида отражает неравномерность свечения вдоль траектории (отрицательное значение яркости является следствием инструментальных эффектов).
- След от болида по видеофрагменту: 1 - основная вспышка; 2 - последняя вспышка. Основная фаза торможения - на пути 23 км.



Инфразвуковые, сейсмические и оптические регистрации

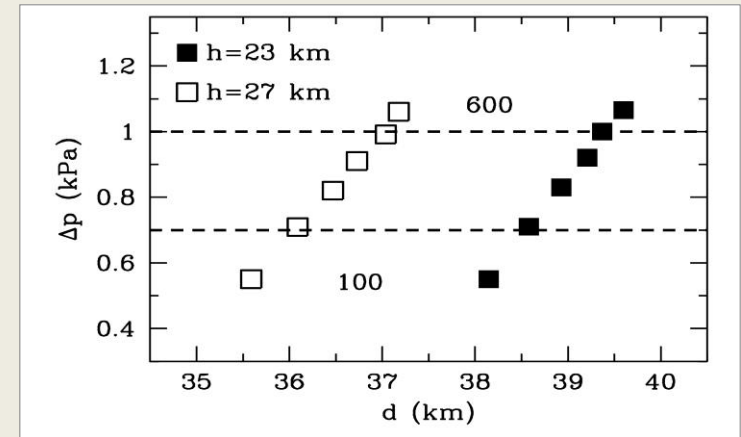
- Вход и разрушение крупных космических тел в атмосфере сопровождается акустическими, инфразвуковыми и сейсмическими возмущениями, вызываемыми ударной волной.**
- Звуковые возмущения (20 Гц - 20 кГц) регистрировались на расстояниях ~ 2 - 2.5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости).**
- Инфразвуковые волны с предельной акустической частотой 3×10^3 Гц распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, и затухают очень слабо.**
- Они зарегистрированы 11-ю инфразвуковыми станциями контролю за ядерными вооружениями (СТВТО) и на расстояниях в несколько тысяч километров, а также микробарометрами Института динамики геосфер РАН.**
- Сейсмические волны от ударной волны регистрировались на расстояниях в сотни и тысячи километров.**
- Магнитуда соответствующего землетрясения оценивается в 2.7 – 4 баллов.**

Оценка энергии

Модель

(Шувалов и др., 2013)

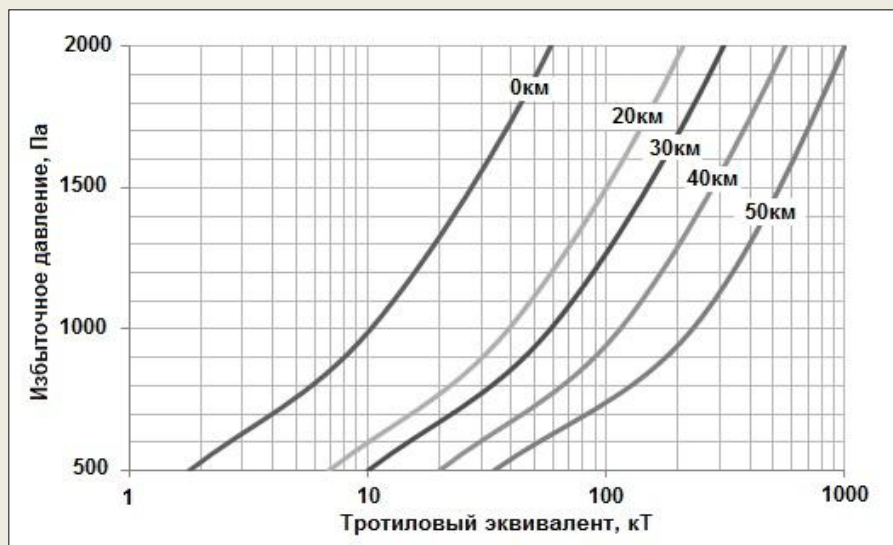
- Реальную зависимость $\Delta p(r)$ при торможении болида можно рассчитать в 3D-гидродинамике, но для приближённых оценок достаточно воспользоваться соотношениями подобия.
- **Оценка энергии зависит от принятой величины избыточного давления в ударной волне, при которой разрушаются оконные стёкла.**
- В первые секунды ударная волна имела существенно цилиндрическую геометрию, радиусом 1.3 км (при точечном взрыве с такой же энергией радиус составил бы 2.5 км).
- Динамический масштаб (асимметрия «верх-низ» сильного взрыва в экспоненциальной атмосфере) мал: $R=(E/P)^{1/3} = 6.3$ км на $h = 23$ км ($< H=7.6$ км).
- При мгновенном взрыве цилиндрическая ударная волна трансформируется в сферическую на расстояниях $r \gg 10$ км от места взрыва, и отклонениями от сферической симметрии можно пренебречь.
- **Полная энергия взрыва оценена $E = 300$ Кт TNT.**
- Учет несферичности ударной волны, атмосферной рефракции и приземной температурной инверсии может немного изменить эту оценку.



Избыточное давление за фронтом ударной волны (в зависимости от расстояния от центра Челябинска до эпицентра. **Квадраты - модели с разной энергией взрыва** (от 100 до 600 Кт TNT). Время распространения ударной волны 141с с высоты 23 км. **Штриховые линии - диапазон избыточного давления в ударной волне** (разрушение около 5% оконных стёкол). **Полное разрушение бетонных стен при избыточном давлении 35 кПа** (Шувалов и др., 2013).

Эмпирические методы оценки энергии

- Использование эмпирических зависимостей избыточного давления от расстояния для сферического и цилиндрического источников в экспоненциальной изотермической атмосфере.
- Для максимальных расстояний 40-50 км от взрыва до районов разрушения остекления в диапазоне избыточных давлений 700-1000 Па и при высоте источника 23 км энергия метеороида должна составлять 100 - 340 Кт ТНТ.



Зависимость избыточного давления на поверхности Земли (на разных расстояниях от проекции источника на поверхность) от тротилового эквивалента для цилиндрического источника энергии длиной 20 км на высоте 22 км (Шувалов и др., 2013).

- Для оценки энерговыделения можно использовать также характерные частоты в спектрах инфразвуковых сигналов, которые составляют 0.012 – 0.025 Гц, что приводит к оценке энергии метеороида в 300-1400 Кт ТНТ.
- Согласно данным спутниковой системы наблюдения, излученная энергия E_r/E_k Челябинского болида составила $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 Кт ТНТ.

Оценка траектории движения метеороида

- Траектория движения была определена путем обработки многих видеоданных.
- Проекция траектории движения на поверхность Земли показана отрезком прямой, проходящей от п. Еткуль к п. Первомайский.
- Восстановлены параметры орбиты Челябинского метеороида (предварительные).
- Сделан однозначный вывод о принадлежности Челябинского тела к семейству астероидов, сближающихся с Землей, типа «Аполлон».



| Большая полуось, а.е | Эксцентриситет | Наклонение град. | Аргумент перигелия, град. | Долгота восходящего узла, град. | Ссылка на источник |
|----------------------|----------------|------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1,73 ± 0,23 | 0,51 ± 0,08 | 3,45 ± 2,02 | 120,62 ± 2,77 | 326,7 ± 0,79 | Zuluaga, Ferrini, 2013 |
| 1,55 | 0,5 | 3,6 | 109,7 | 326,41 | Borovicka et al, 2013 |
| 1,26 ± 0,05 | 0,52 | 2,984 | 95,5±2 | 326,5±0,3 | Zuluaga, Ferrini, Geens 2013 |

**Аэродинамика входа и
восстановление траектории
движения метеороида**

Основные аэродинамические эффекты

- Особенности физики взрыва крупных метеороидов при их полёте в атмосфере Земли достаточно хорошо изучены.
- В основе анализа торможения метеороида в атмосфере – стандартные уравнения гиперзвуковой аэродинамики для метеорных явлений.
- Торможения космического тела и частичное разрушение начинается на высоте $\sim 80-100$ км, но оно мало вплоть до возникновения слоя резкого аэродинамического торможения и поперечного расширения дробящегося тела под действием скоростного напора и градиента давления на лобовой поверхности болида на высоте ~ 25 км.
- При движении метеороида происходит изменение полей давлений и относительных скоростей интенсивного растекания дробленой массы; это сопровождается изменением продольного и поперечного объемов и ростом аэродинамического сопротивления.
- При достижении критических давлений по телу распространяется фронт разрушений, перемещавшийся со скоростью порядка скорости упругих волн в веществе метеороида с прочностью $\sigma = 10^4 - 10^7$ дин/см² происходит дробление.

Модельные оценки Челябинского события

(Григорян и др., 2013).

- Расход энергии на абляцию и испарение и потеря массы при движении тела в атмосфере были малы (коэффициент теплопередачи для потока излучения из ударного слоя и частиц атмосферы экспоненциально убывает с понижением высоты до $C_H \sim 10^{-3}$ и параметр абляции тела $\sim 10^{-13} - 10^{-14}$ г/эрг).
- При скоростях входа $V \sim 18$ км/с удельная энергия в 10-100 раз превышала теплоту сублимации материала тела, резко возросла температура за счет импульсного превращения кинетической энергии в тепловую. что привело к возникновению облака горячей плотной и интенсивно светящейся плазмы с температурой $\sim 10^4$ К.
- В слое резкого аэродинамического торможения на высоте ~ 23 км произошла генерация сильной ударной волны, дробление тела и эффект концевой вспышки.
- Процесс входа завершился почти полным торможением болида и его разрушением в тонком слое в окрестности экстремальной точки за время $\sim 0,5$ с.
- Можно думать, что Тунгусский взрыв и вспышки ярких метеоров в самом конце их пути – явления одной природы.

Эффекты в верхней атмосфере

Аэрозольный шлейф Челябинского болида

- Болид вызвал значительный выброс метеоритной пыли в стратосферу.
- Анализ наземных фотографий показал, что вершина облака, вызванного главным взрывом, поднялась из-за конвекции на 12 км примерно за 100 секунд, что дает оценку максимальной вертикальной скорости в 110-120 м/сек.
- Расчеты показали, что верхняя часть шлейфа, испытывающая сильный ветровой снос, была на высоте 57 км в мезосфере.
- Данные MTSAT-2 свидетельствуют, что мезосферная часть шлейфа смещалась к югу-востоку, в то время как стратосферная часть – на северо-восток со скоростями свыше 100 км/час.

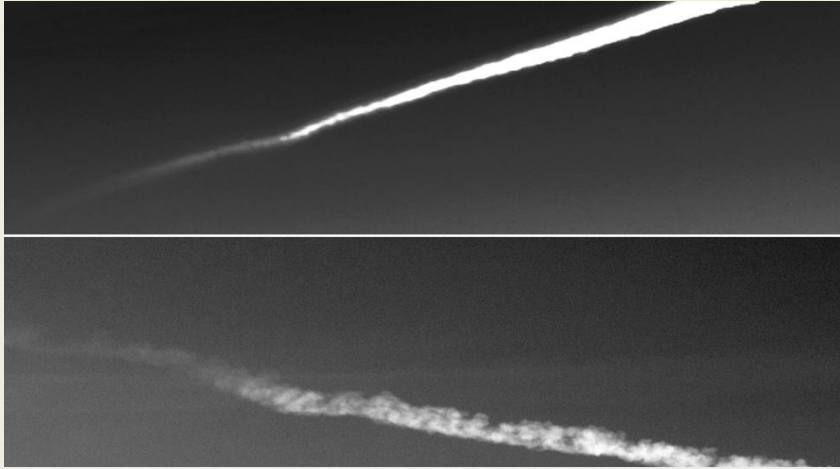
Высота и координаты основной вспышки (независимое определение):

- Среднее значение высоты взрыва или главной вспышки: 22.5 ± 1.6 км для координат 54.93 N, 61.52 E.
- Ошибка в определении координат точки взрыва составляет примерно 0.2 градуса по долготе и 0.02 градуса по широте.
- Полученное значение хорошо соответствует данным НАСА для высоты взрыва в 23.3 км и координат 54.8 N, 61.1 E.



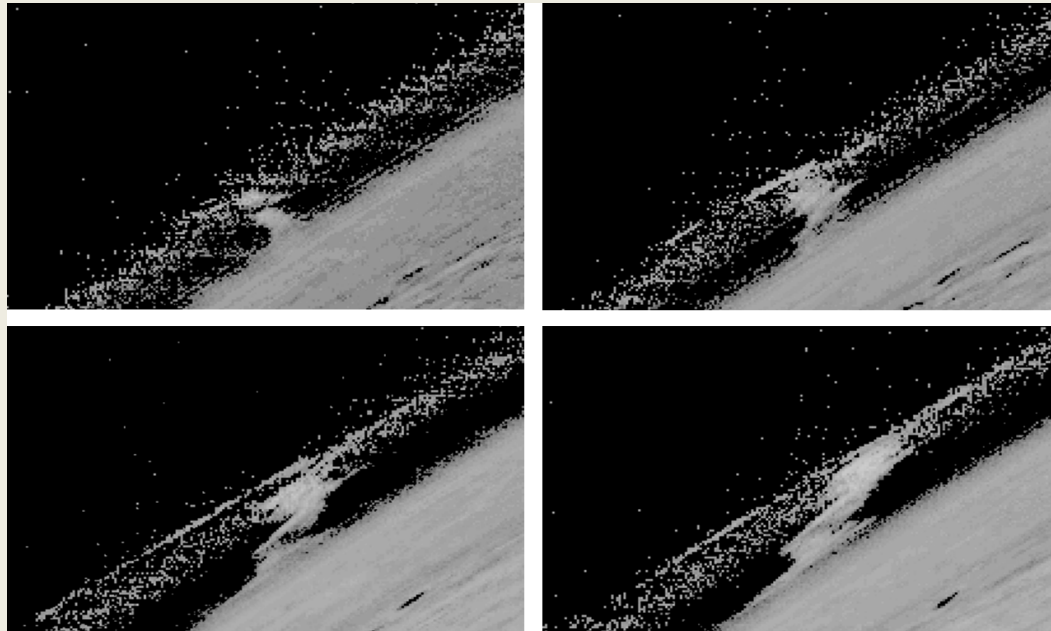
Фотографии через 10, 20 и 73 с после взрыва.

Наблюдения в мезосфере и ионосфере



Высота мезосферной части шлейфа

Скорость ветрового переноса



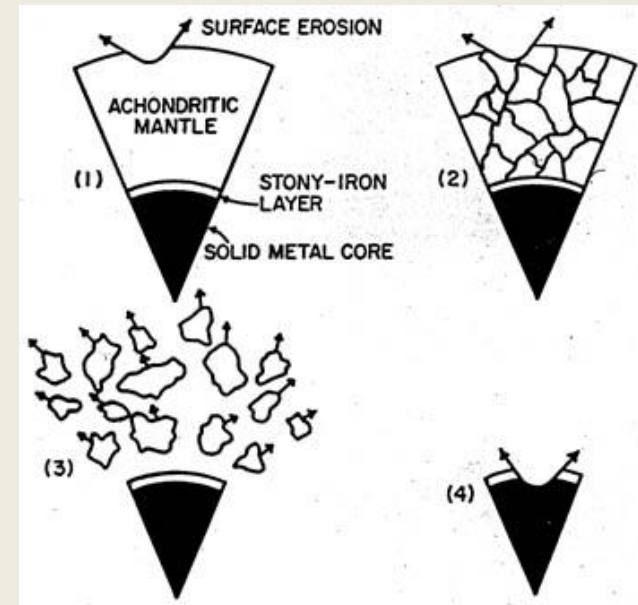
Эффекты в ионосфере:

- Возмущения отмечались в спорадическом слое Es на высоте около 100 км и во всей толще ионосферы.
- К ним относятся изменение электронной концентрации и высоты слоя F2 (до 2,7 раз в максимуме) на расстояниях до 2000 км, где они сохранялись в течение более 10 часов.

Космохимические исследования

Астероиды и основные типы метеоритов

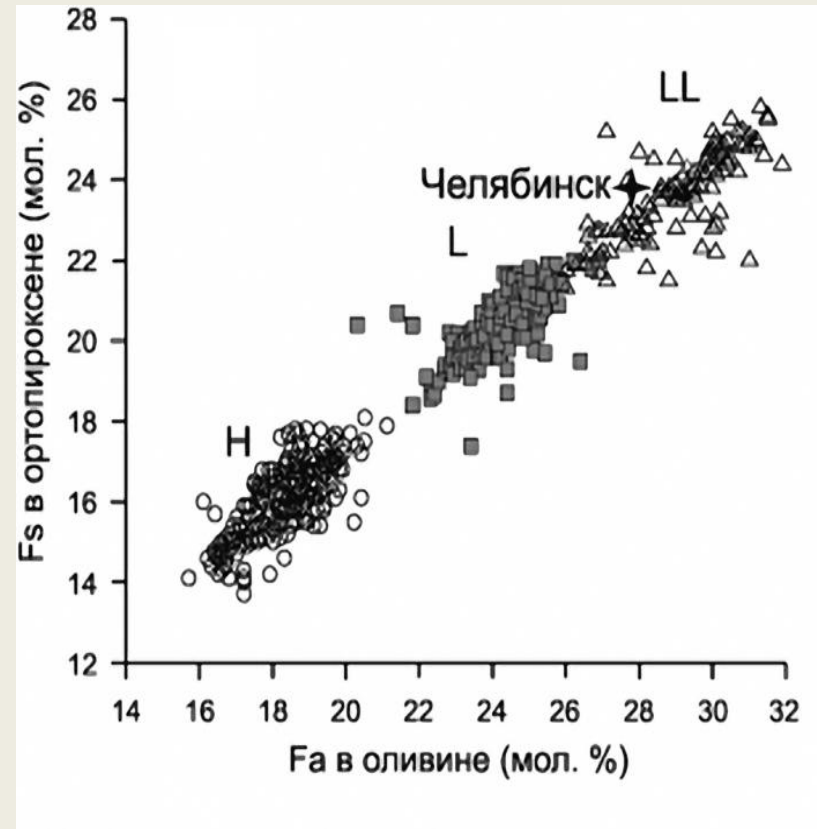
- Метеориты – осколки астероидов и метеороидов, образующиеся в результате соударений.
- Общее число астероидов размером ≥ 1 км $\sim 10^5$; из них обнаружено $\sim 90,000$, из которых $\sim 90\%$ занесено в каталоги.
- Общая масса астероидов Главного пояса $\sim 1/2000$ массы Земли.
- Основные композиционные классы астероидов и метеоритов:
 - С - углистые хондриты
 - S - обыкновенные хондриты (каменные)
 - М - металлические (железные).
- Наиболее распространены обыкновенные хондриты, в которых присутствуют хондры – одна из наиболее древних минеральных структур.



- Метеорит Челябинск относится к классу каменных метеоритов – обыкновенных хондритов.

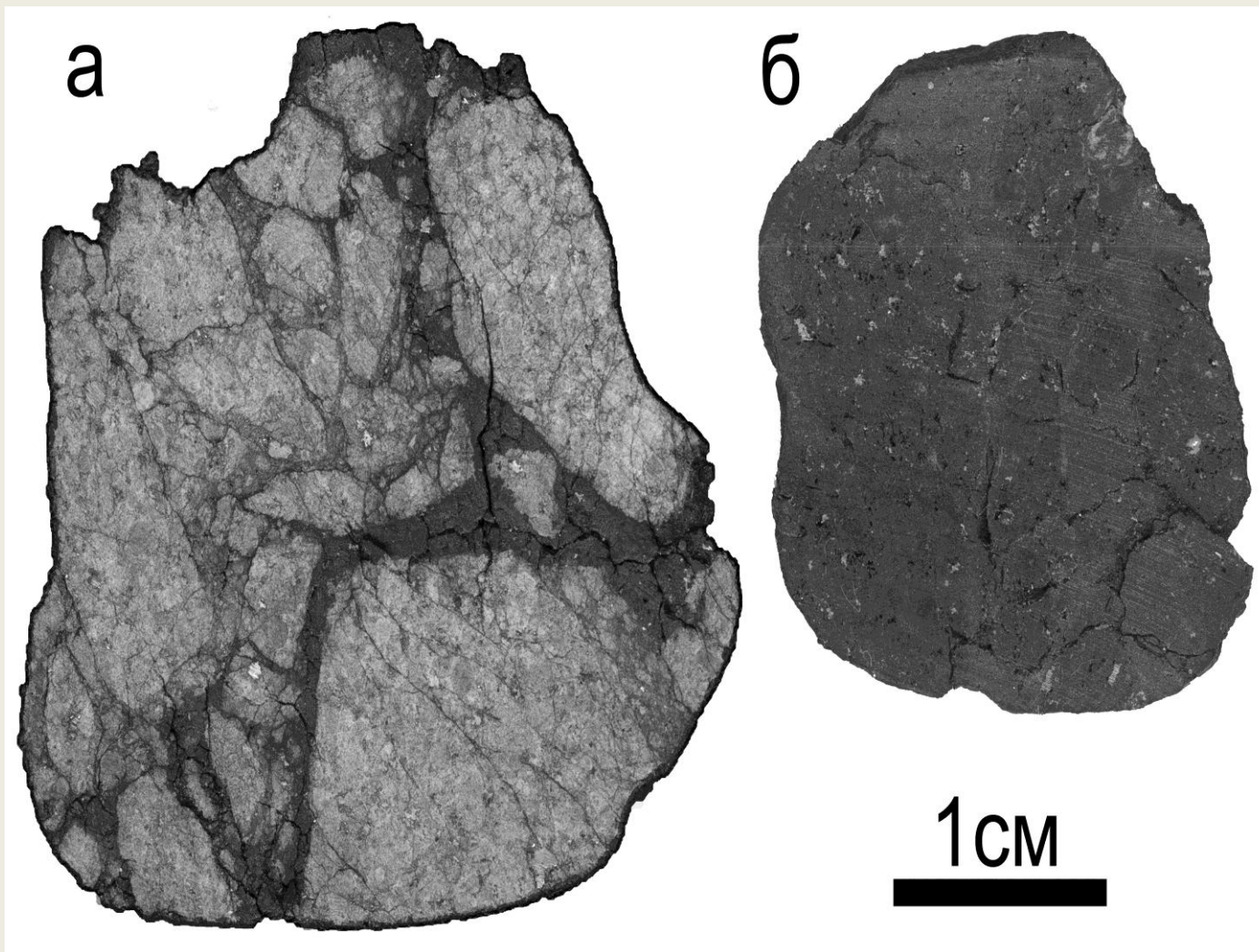
Тип метеорита Челябинск

- Обыкновенные хондриты делятся на три группы:
 - H-высоко-железные
 - L- низко-железные
 - LL- очень низко-железные.
- Основное отличие - в соотношении содержания железа в оливине (фаялита) и пироксене (ферросиллита).
- По содержанию железа и соотношению его окисленной и восстановленной форм в оливине и пироксене Челябинский метеорит отнесен к химическому типу LL.
- Этот вывод подкрепляет изотопный состав кислорода ^{16}O - ^{17}O - ^{18}O , наличие камасита и тенита в металлической фазе (Ni), повышенное содержание кобальта в камасите и химия минеральных фаз.



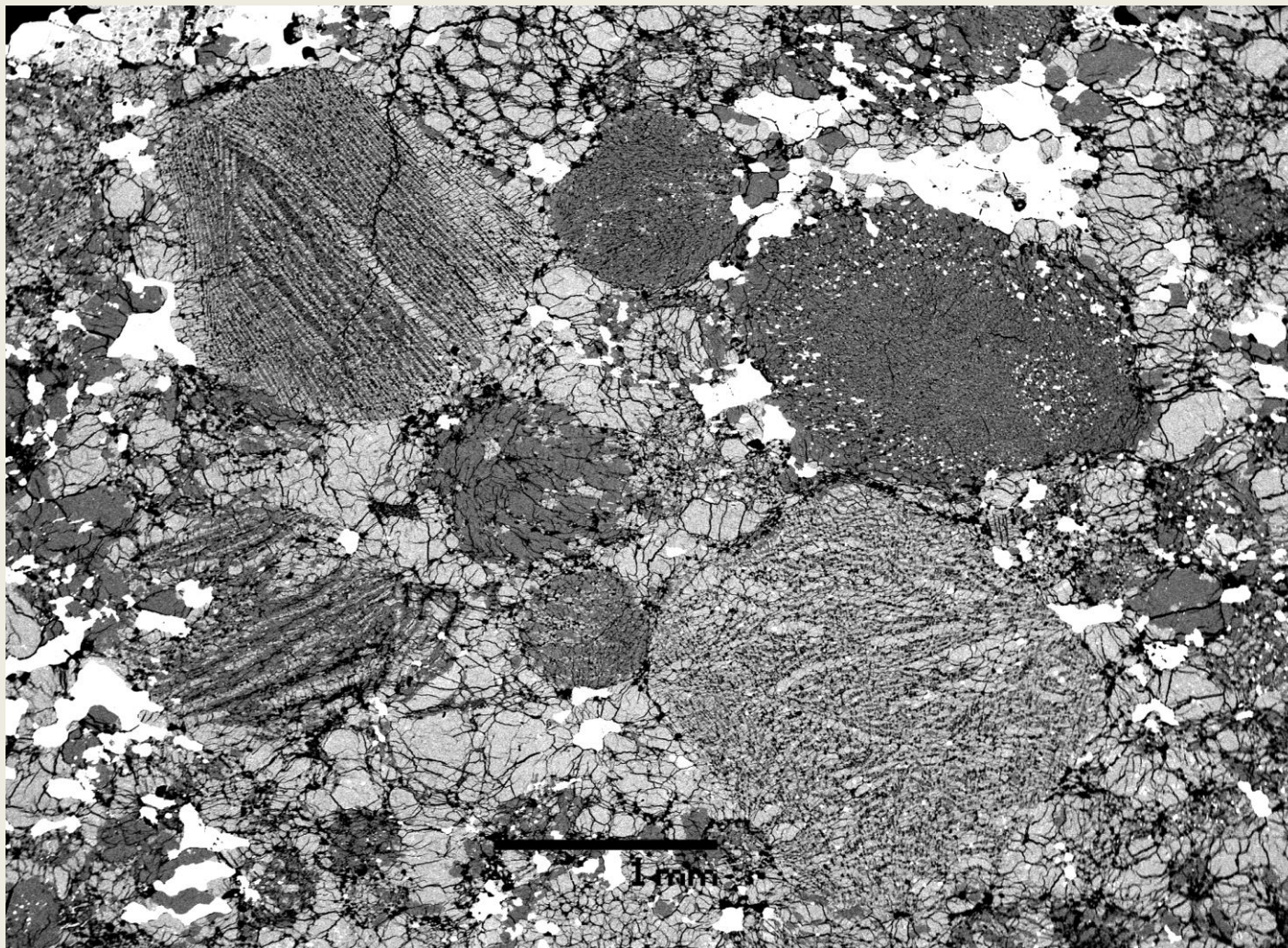
- Метеорит соответствует 5-ому петрологическому типу из семи, различающихся степенью температурного метаморфизма и содержанием углерода (для LL5 $T = 700-750\text{ C}$).

Фрагменты метеорита Челябинск



а) светлая разновидность
б) темная разновидность

Структура метеорита. Изображение в обратно-рассеянных электронах



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

| Элемент | Светлая фаза | Темная фаза | Характерно для LL |
|---------|--------------|-------------|-------------------|
| Li | 2,0 | 2,0 | 2,1 |
| Be | 0,035 | 0,036 | 0,051 |
| V | 68,7 | 66,6 | 75 |
| Rb | 3,7 | 3,4 | 3,1 |
| Zr | 6,9 | 8,6 | 5,9 |
| La | 0,38 | 0,34 | 0,315 |
| Ce | 0,95 | 0,46 | 0,907 |
| Sm | 0,22 | 0,24 | 0,200 |
| Lu | 0,039 | 0,038 | 0,033 |
| Th | 0,053 | 0,052 | 0,043 |
| U | 0,022 | 0,020 | 0,013 |
| Co | 643 | 584 | 490 |
| Ni | 10854 | 12121 | 10200 |
| Cu | 83,1 | 95,7 | 80 |
| Ga | 4,6 | 4,5 | 5,0 |
| Ir | 0,46 | 0,45 | 0,360 |
| Pt | 2,2 | 1,6 | 0,85 |
| Au | 0,21 | 0,13 | 0,14 |

• По составу обе фазы практически идентичны и совпадают с составом, типичным для метеоритов LL-типа. Из этого следует, что темный расплав это – не продукт магматизма и дифференциации, а это - ударный расплав.

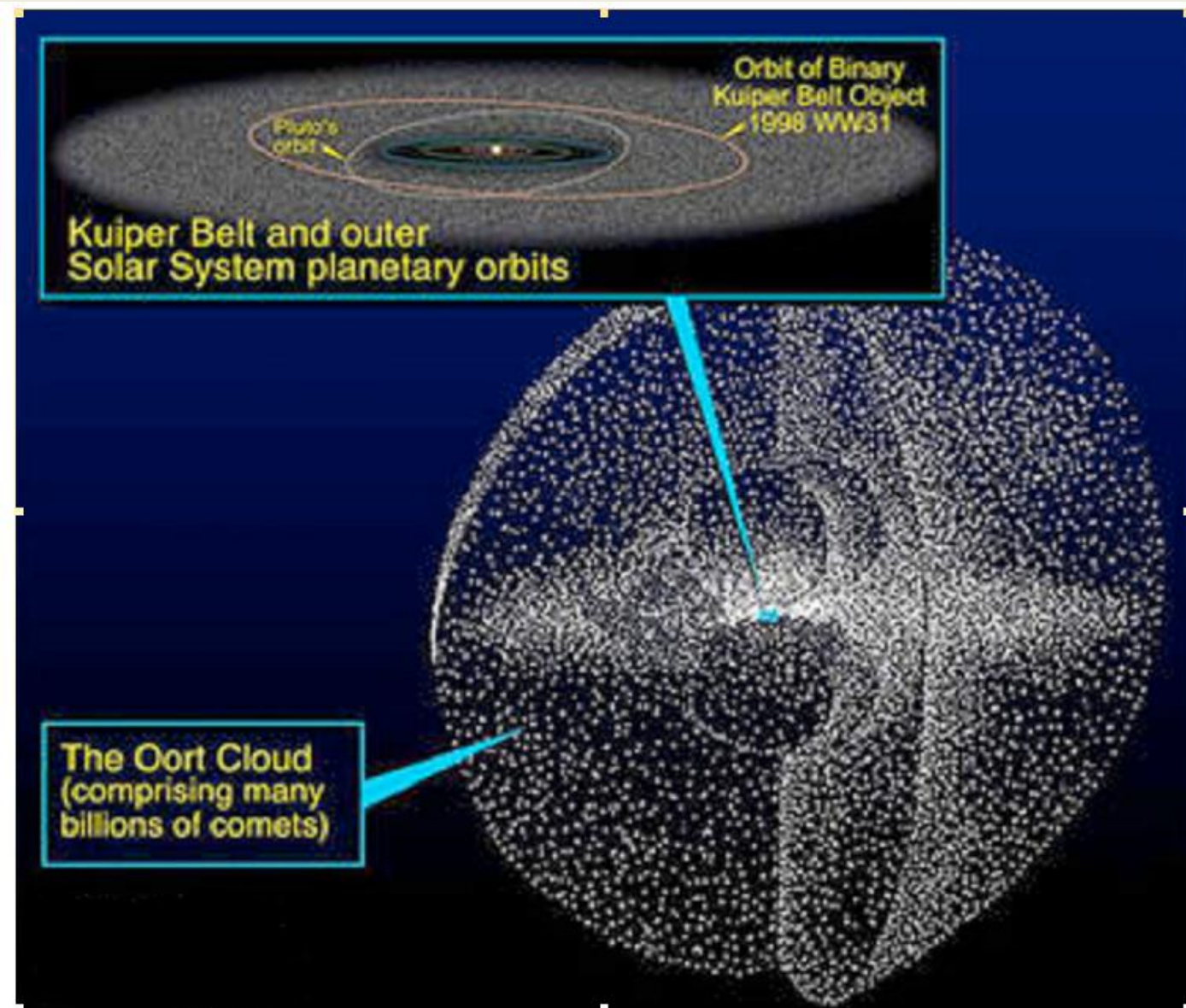
Челябинский метеорит отнесен к группе умеренного ударного метаморфизма S4 (вещество испытало ударные нагрузки ~ 25-35 ГПа).

История

- Реконструировать историю позволяют морфология образца и изотопный анализ.
- В структуре фрагментов метеорита, значительная часть которых представляет собой ударно-расплавную брекчию, обнаружено наличие тонких темных прожилков, заполненных тонкозернистым ударным расплавом, а наличие плоскостей скольжения на контактах трещин с матрицей свидетельствует о фрикционном происхождении этого расплава.
- Изотопный анализ по свинцу ($Pb^{206-207-208}$) дает основание считать, что возраст Челябинского метеорита 4,56 млрд. лет, т.е. он практически ровесник образования Солнечной системы, и что ударный расплав (темная фаза) образовался в самую раннюю эпоху (Bouvier, 2013), вскоре после завершения аккреции в газопылевом диске и роста первичных тел за счет соударений.
- Вместе с тем, изотопный анализ ($^{143}Nd/^{144}Nd - ^{150}Sm/^{144}Nd$) указывает на возраст ударного события ~ 300 млн. лет назад, с появлением обширных ударных расплавов - темной фазы (Галимов, 2013).
- Ответ на вопрос о том, было ли одно или два события даст дальнейший детальный анализ изотопии фрагментов.
- Вероятно, при входе в атмосферу и торможении метеороид, ранее отколовшийся от более крупного астероида, дробился по границам включений темного ударного расплава в светлую тонкозернистую матрицу, поскольку фрагменты, целиком состоящие из светлого и темного материала, встречаются редко.

Семейства астероидов и комет. Астероидно-кометная опасность

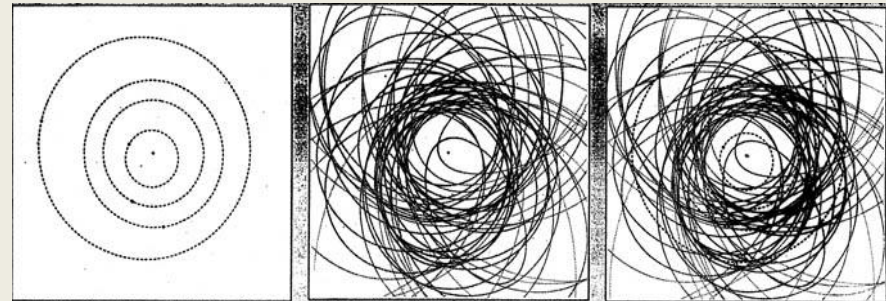
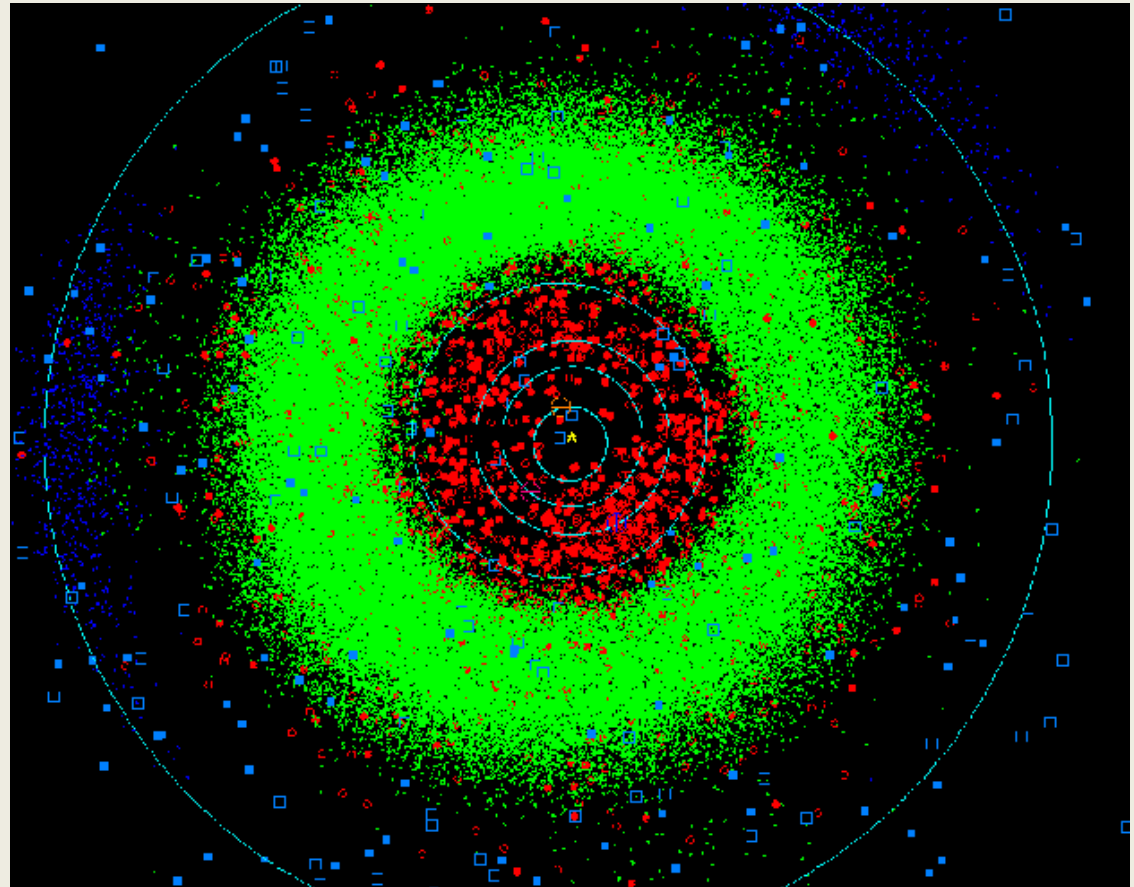
Основные семейства малых тел



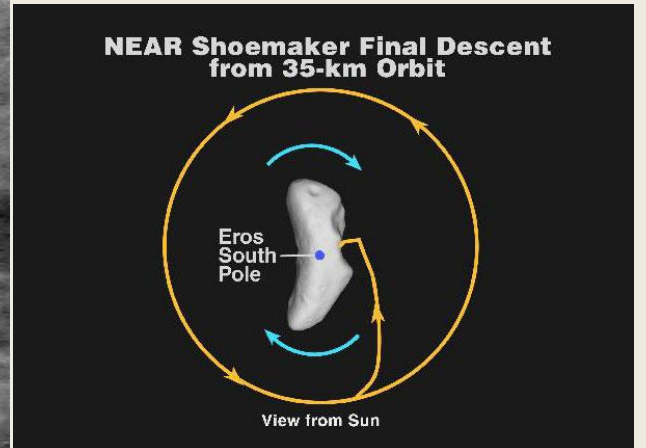
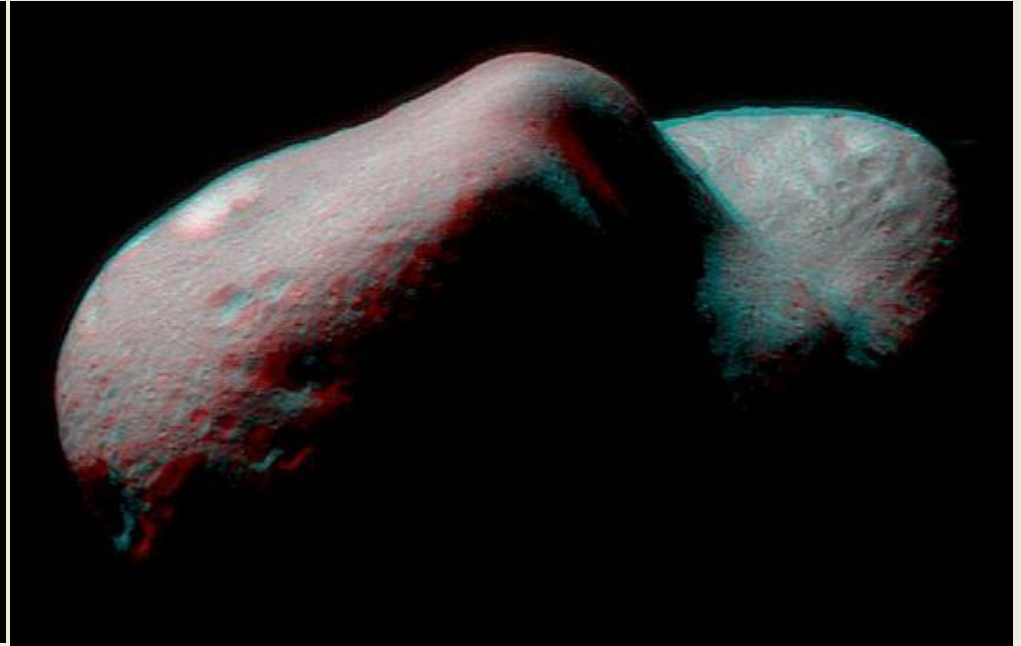
Астероиды, сближающиеся с Землёй (NEO)

3 Группы:

- **Амур** – пересекающие орбиту Марса, приближающиеся к орбите Земли и эволюционирующие в NEO за 100 - 1000 лет.
- **Аполлон** – пересекающие орбиту Земли.
- **Атон** – заходящие внутрь орбиты Земли.

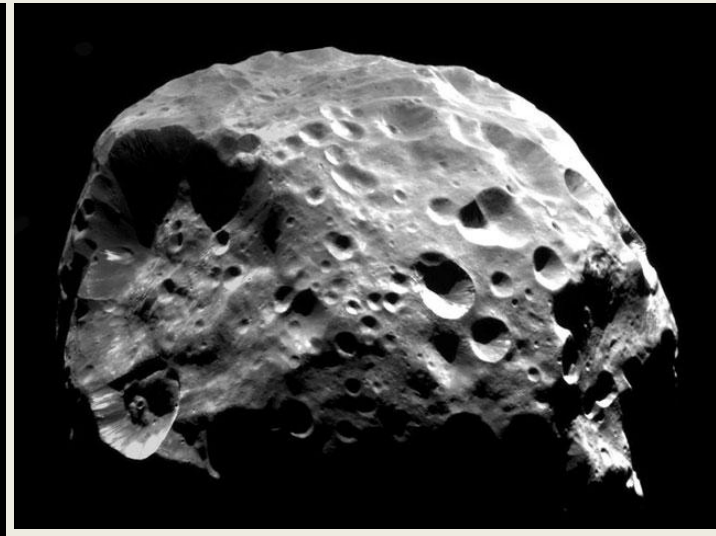
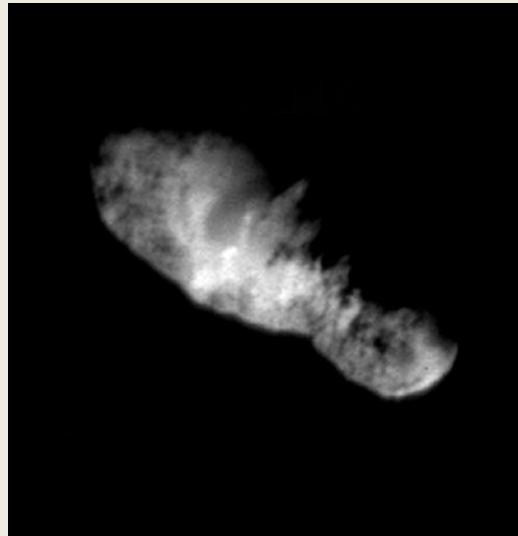
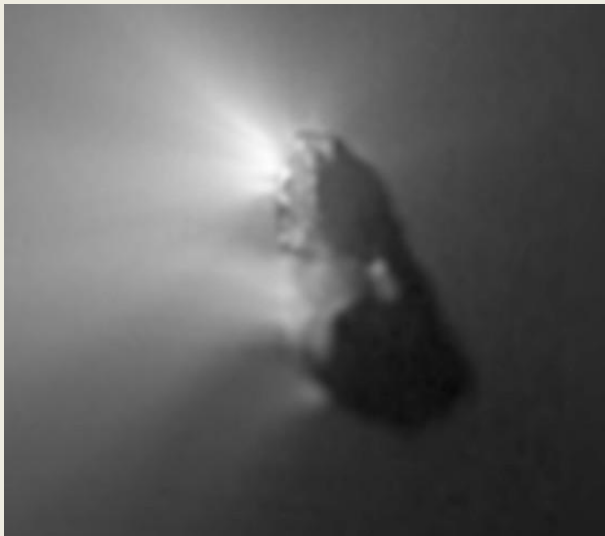


Формы астероидов

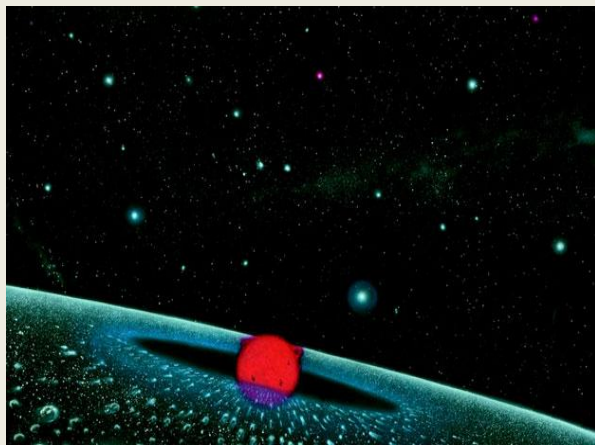
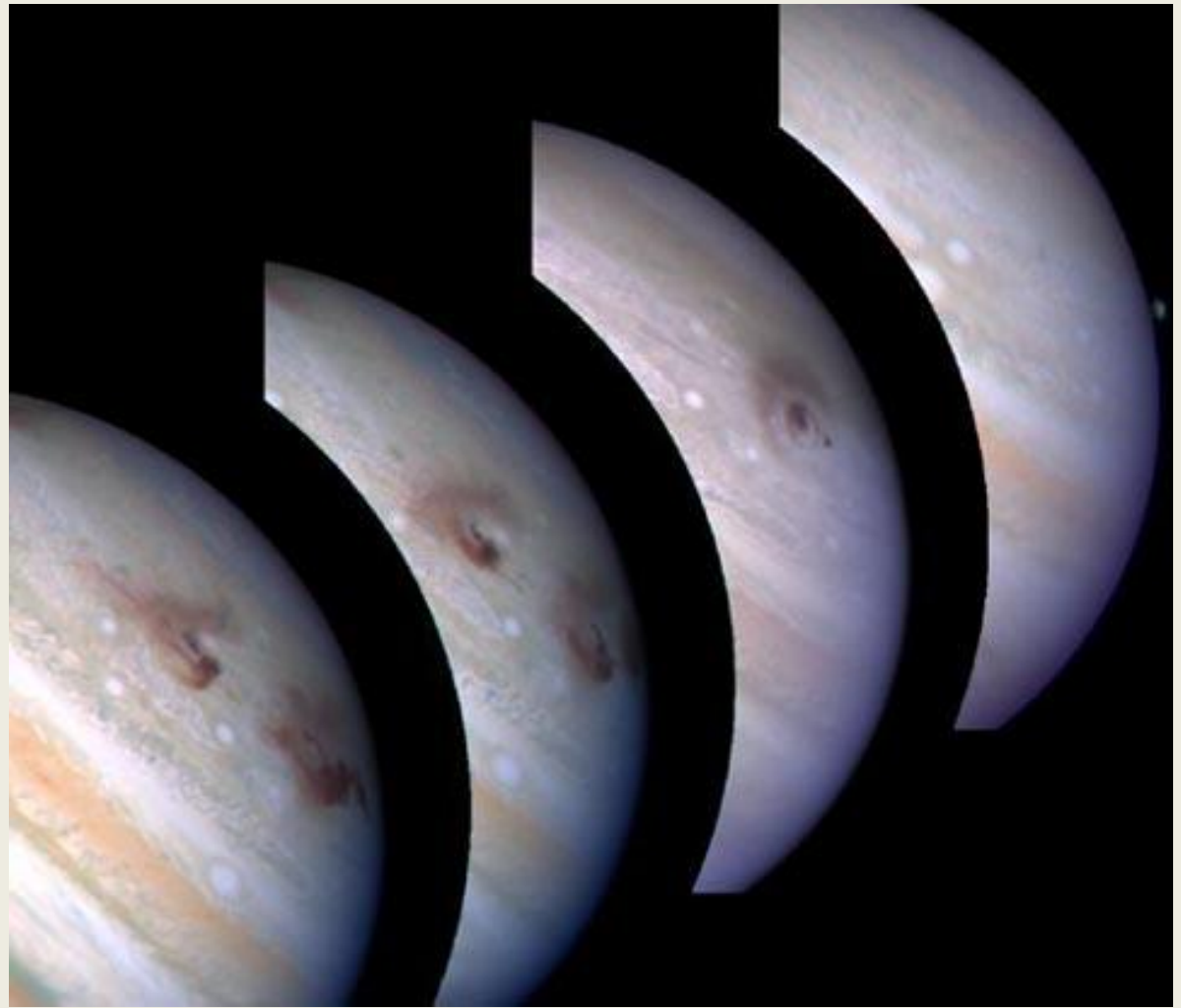
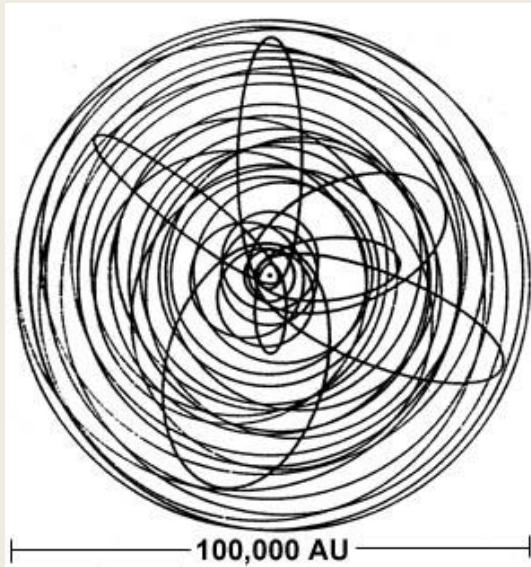


Кометы

- «Хранилища» первичного вещества
- Долгопериодические и короткопериодические кометы
- Происхождение, угроза



Столкновения комет с планетами

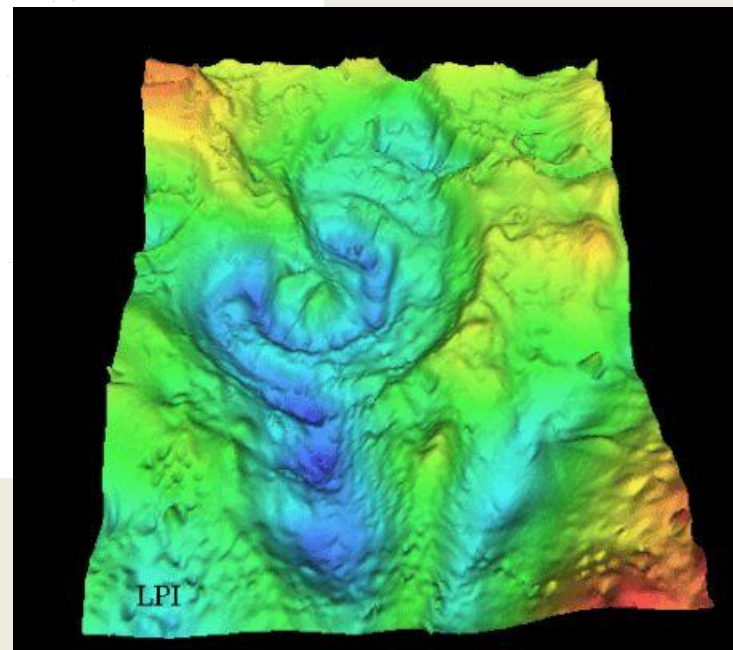
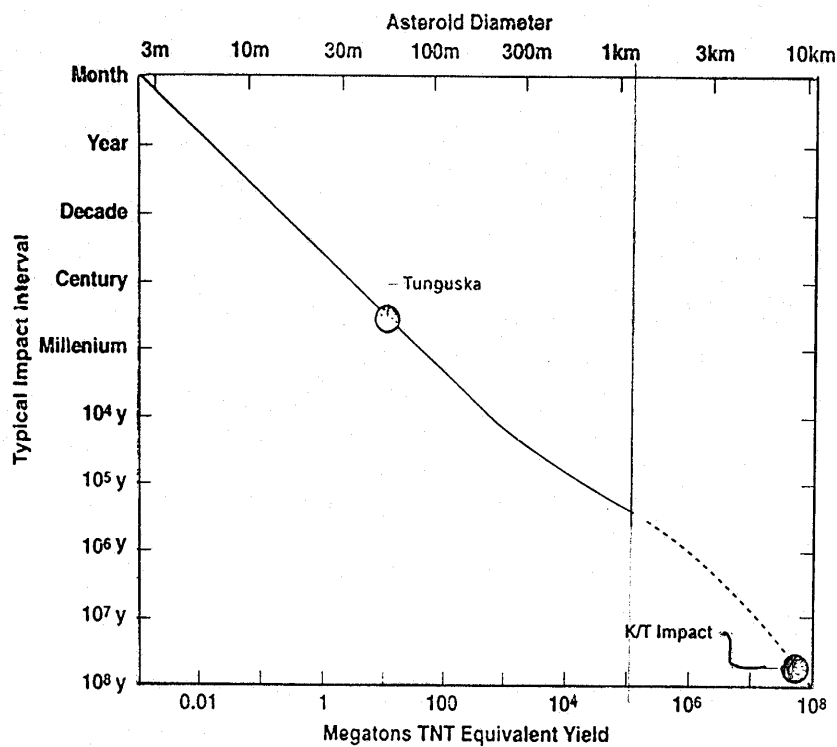


Столкновения кометы Шумейкера-Леви с Юпитером

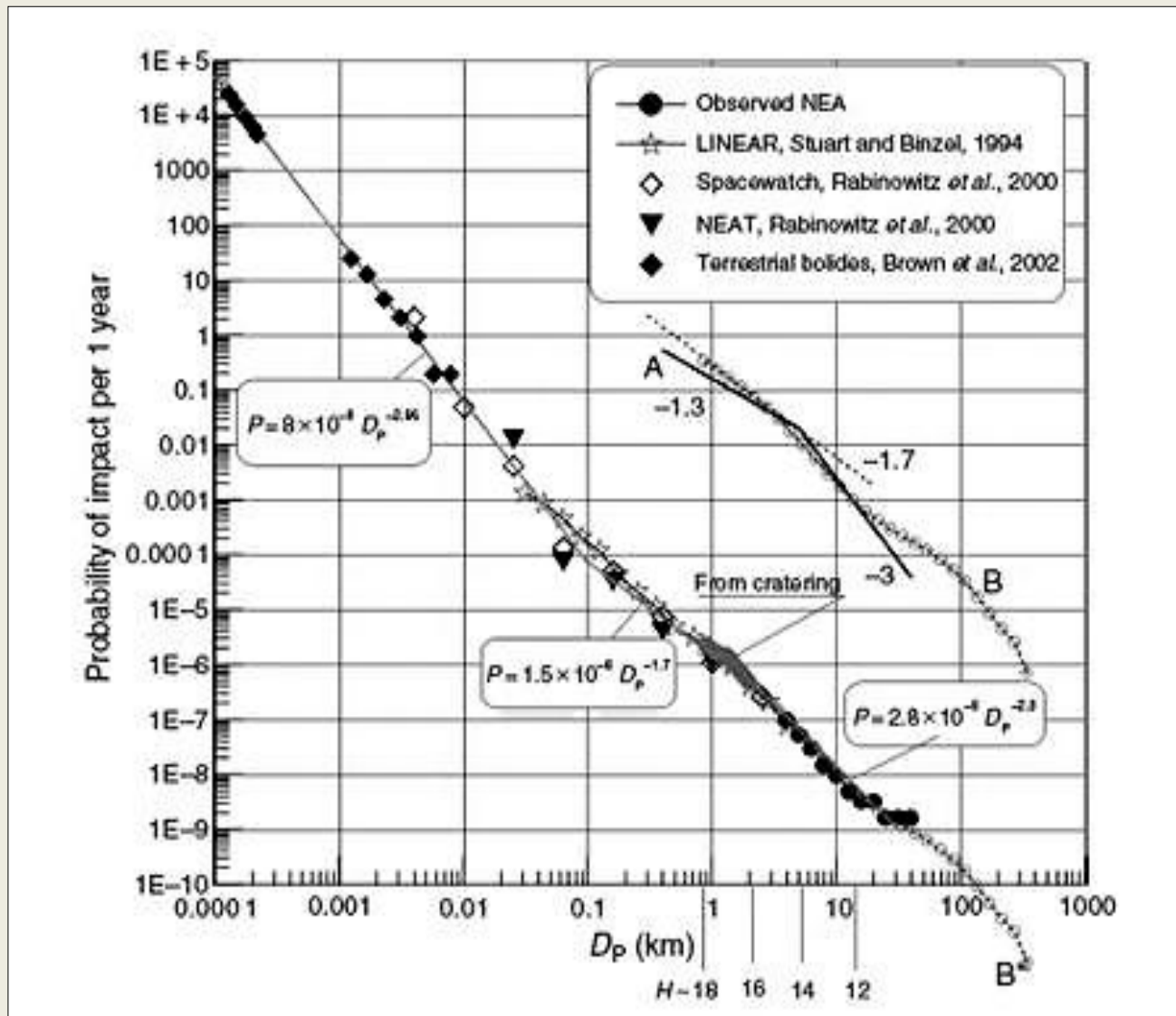
Космические угрозы

- Осознание реальности космических угроз (астероидно-кометной опасности и космического мусора) пришло только в последние десятилетия, и Челябинское событие стало еще одним серьезным аргументом в пользу необходимости разработки специальных мер.
- 29.09 еще один метеороид размером с Челябинский метеорит пролетел на расстоянии ~ 11 000 км от Земли.
- Для противодействия космическим угрозам первоочередной практической задачей является надежное и оперативное обнаружения опасных небесных тел: астероидов, сближающихся с Землей, их фрагментов – метеороидов и комет.
- В части астероидно-кометной опасности ограничениями служат размер тел (50 м) и определения угрожающих (столкновительных) орбит.
- Наряду с системой наземных телескопов различной проникающей силы и апертуры, предложены системы космического базирования с задачей обеспечения наибольшего охвата и максимальной быстроты оповещения об опасных объектах.
- Активные методы защиты (система Safeguard) включают в себя различные средства уничтожения/изменения орбиты потенциально опасных объектов

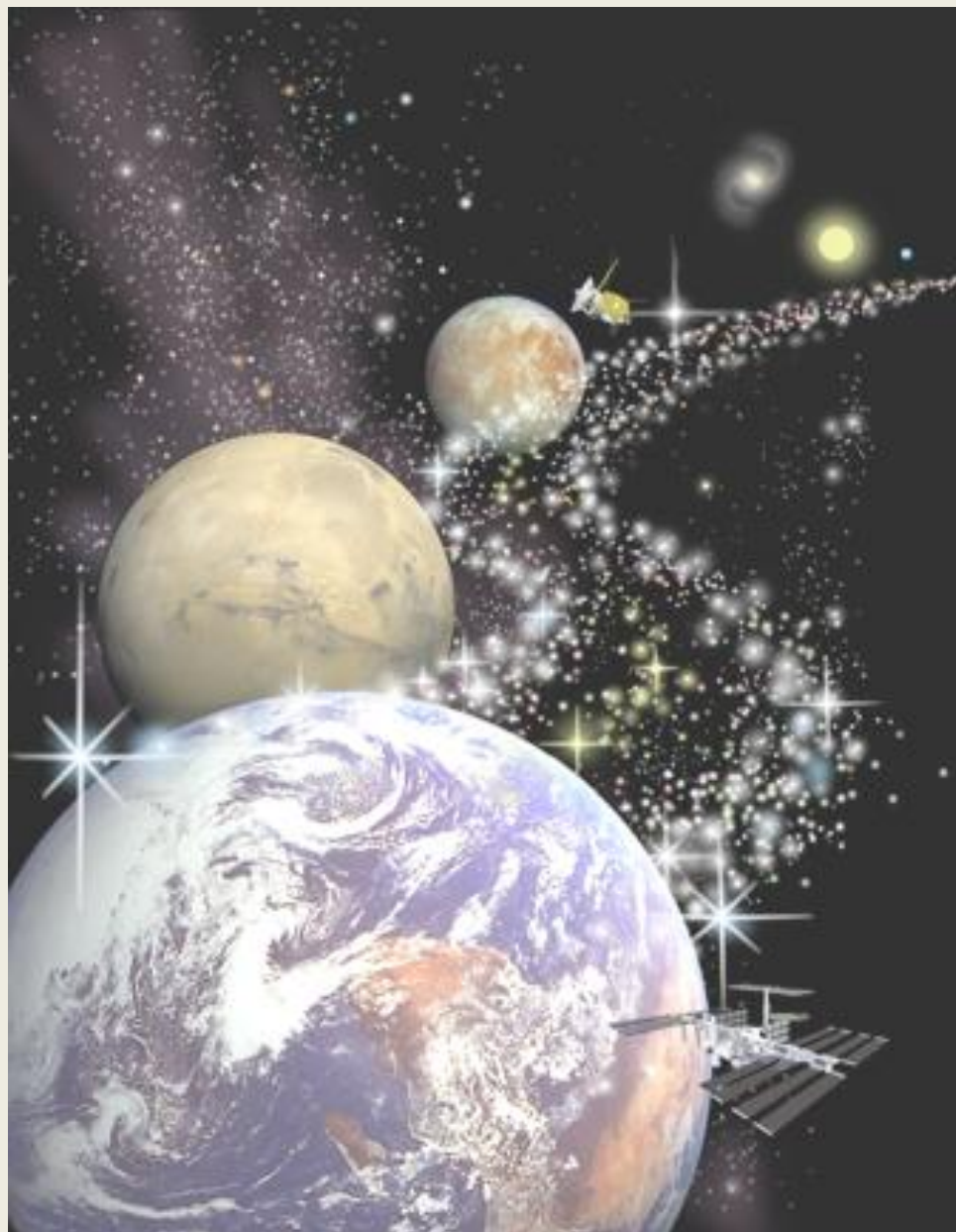
Cumulative energy-frequency curve for impacts on Earth



Частота столкновения с Землей тел различных размеров



Транспорт вещества в Солнечной системе



Заключение

- Челябинское событие над территорией России дало в руки ученых бесценные фрагменты одного из малых тел Солнечной системы, пополнив тем самым коллекции метеоритов различных петрологических классов.
- Изучение малых тел Солнечной системы – астероидов, комет, метеороидов – это ключ к пониманию процессов химической, тепловой и динамической эволюции протосолнечной туманности и протопланетного диска, процесса образования планет.
- С малыми телами связаны процессы миграции вещества в Солнечной системе, в том числе переноса летучих, включая появление воды на Земле, и, возможно, процессов зарождения и распространения жизни.
- Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности (АКО).
- Проблеме АКО включает в себя астрономические, технические и организационные аспекты.
- Обсуждаются различные методы и средства противостояния АКО.

Источники:

- Доклады членов экспедиций в район падения Челябинского метеорита на Объединённом семинаре в ГАИШ МГУ 21 марта 2013 года
Публикации:
- В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай, М. А. Шеляков, Ю. В. Пахомов, Б. М. Шустов, В. В. Шувалов, Е. Е. Бирюков, Ю. С. Рыбнов, Маров М.Я., Л. В. Рыхлова, С. А. Нароенков, А. П. Карташова, В.А.Харламов, И.А.Трубецкая. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы. Т.47, №5, 2013.
- М.Я. Маров, Б.М. Шустов Челябинское событие как астрономическое явление. Геохимия №7, 2013.
- С.С. Григорян, Ф.С. Ибодов, С.И. Ибадов . ЧЕЛЯБИНСКИЙ СУПЕРБОЛИД: К ФИЗИКЕ ВЗРЫВА Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы Т. 47, №5, 2013.
- В. В. Шувалов, В. В. Светцов, И. А. Трубецкая. ОЦЕНКА РАЗМЕРА ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЙ, ПРОИЗВОДИМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ УДАРАМИ АСТЕРОИДОВ РАЗМЕРОМ 10-300 МЕТРОВ. Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы. Т. 47, №5, 2013.
- Э.М. Галимов . Метеорит Челябинск - хондрит класса LL5 . Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы. Т. 47, №5, 2013.
- Э.М. Галимов, В.П. Колотов, М.А. Назаров и др. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск. Геохимия №7, 2013.
- Горькавый Н.Н. Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А., Горькавый И.Н, Ахметвалеев М.М. Аэрозольный шлейф Челябинского болида. Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы. Т. 47, №5, 2013.
- Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова, Ю. П. Кулешов, Ю.Н. Дубов, Елкин К.С., Вениаминов С.С. Боровин Г.К., Молотов И.Е. Нароенков С.А., Барабанов С.И., Емельяненко В.В., Девяткин А.В., Медведев Ю.Д., ШОР В.А., Холшевников К.В. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИМ УГРОЗАМ: АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ. . Астрон. Вестник. Исследования Солнечной системы. Т. 47, №5, 2013.

Благодарности

Автор благодарен своим коллегам, вместе с которыми обсуждались предварительные результаты исследований Челябинского события, и соавторам статей в научных журналах с изложением и анализом этих результатов.

Благодарю за внимание!