



# **Метеорит Челябинск: 10 лет на Земле**

**В. И. Гроховский, М. Ю. Ларионов, А. Ю. Пастухович,  
Е. В. Петрова, Р. Ф. Муфтахетдинова, Г. А. Яковлев,  
В. В. Шарыгин, Е. В. Брусницына**

**Уральский федеральный университет,  
Физико-технологический институт  
EXTRA TERRA CONSORTIUM,  
г. Екатеринбург**

15 февраля 2013г.  
9 час 22мин (местное время)



Ахметвалеев Марат Р  
maratvaliev@yandex.ru

17.02.2013, озеро Чебаркуль



18.02.2013,  
НОЦ НАНОТЕХ УрФУ



# Chelyabinsk ~54°49'N, 61°07'E Russian Federation

Fell: February 15, 2013, 3:22 am (UT)

Среди падений LL хондритов – 2%

Classification: Ordinary chondrite (LL5)

**History:** At 9:22 a.m. (local time) on February 15, 2013 a bright fireball was seen by numerous observers in parts of Kurgan, Tyumen, Ekaterinburg and Chelyabinsk districts. Images of the fireball were captured by many video cameras especially in Chelyabinsk. Residents of the Chelyabinsk district heard the sound of a large explosion. The impact wave destroyed many window glasses in Chelyabinsk and surrounding cities. A lot of people were wounded by glass fragments. A part of the roof and a wall of the Zn-plant and a stadium in Chelyabinsk were damaged also. Numerous (thousands) stones fell as a shower around Pervomaiskoe, Deputatsky and Yemanzhelinka villages ~40 km S of Chelyabinsk. The meteorite pieces were recovered and collected out of snow by local people immediately after the explosion. The snow cover was about 0.7 m in thick. The falling stones formed holes surrounded by firm snow. Largest stones reached a frozen soil. It is suggested that a stone broke the ice of the Chebarkul Lake located 70 km W of Chelyabinsk. Small meteorite fragments were found around the lake. The fishermen did not find any stones on the bottom of the lake.

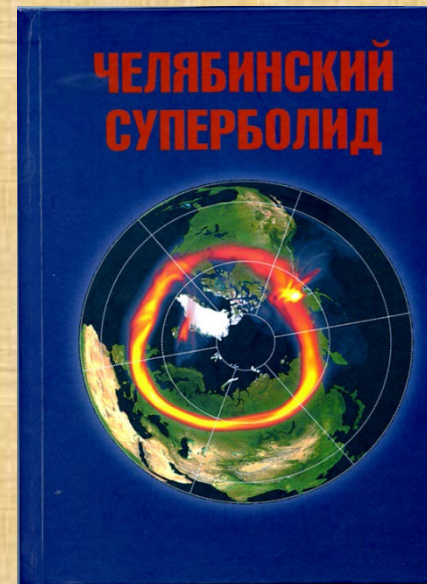
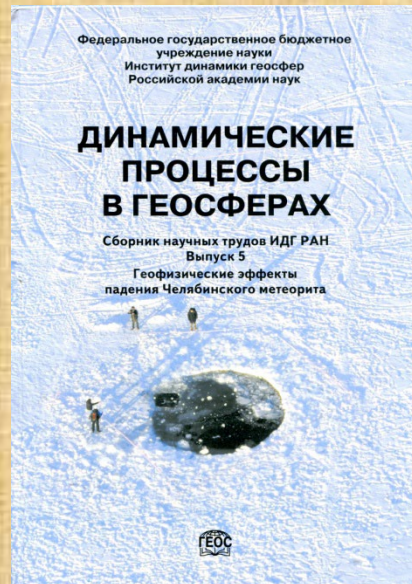
**Physical characteristics:** The meteorite stones and fragments are from 1 g to 1.8 kg and 1 to 10 cm (mainly 3-6 cm) in size. The total mass collected by local people is certainly > 100 kg and fresh uncrusted stones are mostly common. The fusion crust is black or brown and fresh. Broken fragments of uncrusted stones is fresh but in some pieces there is evidence for weak oxidation of metal grains.

**Petrography:** (D.D.Badyukov and M.A.Nazarov, *Vernad*). The majority (2/3) of the stones consist of light lithology with a typical chondritic texture. Chondrules (~63%) are readily delineated and set within a fine-grained matrix. The chondrule diameter is 0.93 mm. The chondrule glass is devitrified. The main phases are olivine and orthopyroxene. Olivine has mosaicism and planar fractures. Rare grains of augite and clinobronzite are present. Small and rare feldspar grains show undulatory extinction, planar deformation features, and are partly isotropic. Troilite (4 vol.%) and FeNi metal (1.3 vol.%) occur as irregularly shaped grains. Accessories are chromite, ilmenite, and Cl-apatite. A significant portion (1/3) of the stones consists of a dark fine-grained impact melt containing mineral and chondrule fragments. Feldspar of the lithology is well developed and practically isotropic. No high-pressure phases were found in the impact melt. There are black colored thin shock veins in both light and dark lithologies.

**Geochemistry:** (M.A.Nazarov, N.N.Kononkova, and I.V.Kubrakova, *Vernad*). Mineral chemistry: Olivine Fa 27.9±0.35, N=22; orthopyroxene Fs 22.8±0.79, Wo 1.30±0.26, N=17; feldspar Ab 86; chromite Fe/Fe+Mg=0.90, Cr/Cr+Al=0.85 (at.). Major element composition of the light lithology (XRF, ICP-AS, wt%): Si=18.3, Ti=0.053, Al=1.12, Cr=0.40, Fe=19.8, Mn=0.26, Ca=1.43, Na=0.74, K=0.11, P=0.10, Ni=1.06, Co=0.046, S=1.7. Atomic ratios of Zn/Mnx100=1.3, Al/Mn=8.8. The impact melt lithology has almost the same composition but it is distinctly higher in Ni, Zn, Cu, Mo, Cd, W, Re, Pb, Bi (ICP-MS).

**Classification:** Ordinary chondrite (LL5), shock stage S4, weathering W0.





21-22 июня 2013 "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль" г. Чебаркуль

14-15 февраля 2014 "Метеорит Челябинск - год на Земле" г. Челябинск

23-24 мая 2014 "II Метеориты, астероиды, кометы. Падения на Землю, исследования и экологические последствия" г. Чебаркуль

21-23 мая 2015 "III Метеориты, астероиды, кометы" г. Миасс

26-28 мая 2016 "IV Метеориты, астероиды, кометы" г. Екатеринбург

2-4 февраля 2017 "V Метеориты, астероиды, кометы" г. Екатеринбург

5-8 февраля 2018 Минералы + VI МАК г. Екатеринбург

23-27 июля 2018 81 съезд Метеоритного общества г. Москва

27-31 мая 2019 Минералы + VII МАК г. Екатеринбург

25-28 мая 2020 Минералы + VIII МАК г. Екатеринбург

26-28 августа 2021 Минералы + IX МАК г. Екатеринбург

15 февраля 2023 Научные чтения «Метеорит Челябинск. 10 лет на Земле»

29 мая-1 июня 2023 Минералы + X МАК г. Екатеринбург



# Изменение представлений о реальности АКО

Челябинское событие подтвердило реальность проблемы АКО и изменило подход со стороны руководящих органов России.

- Федеральный закон от 13 июля 2015 г. N 215-ФЗ "О Государственной корпорации по космической деятельности "Роскосмос" в части п.14 статьи 7 «Полномочия и функции Корпорации в области управления космической деятельностью», в соответствии с которой Госкорпорация «Роскосмос» ***“обеспечивает совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, Российской академией наук и иными организациями изучение, прогнозирование и определение астероидно-кометной опасности, а также разработку методов и средств ее парирования с учетом международного характера проблемы”***.
- В 2022 г. утверждена «Концепция создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве ``Млечный путь" на период 2022--2025 годов и на перспективу до 2035 года».

Тела, проходящие с дневного неба, невозможно своевременно обнаружить с помощью наземных средств. Необходимы космические инструментов.

**Предложение ИНАСАН Система Обнаружения Дневных Астероидов (СОДА)**

# Челябинск: Астероид – болид - метеорит

Размеры метеороида 19м, 13000 т

Орбита Apollo

Полет болида  $V \sim 19\text{км/с}$  254 км

Фрагментация

Взрыв

Темная траектория

Методы поиска вещества

Сбор вещества

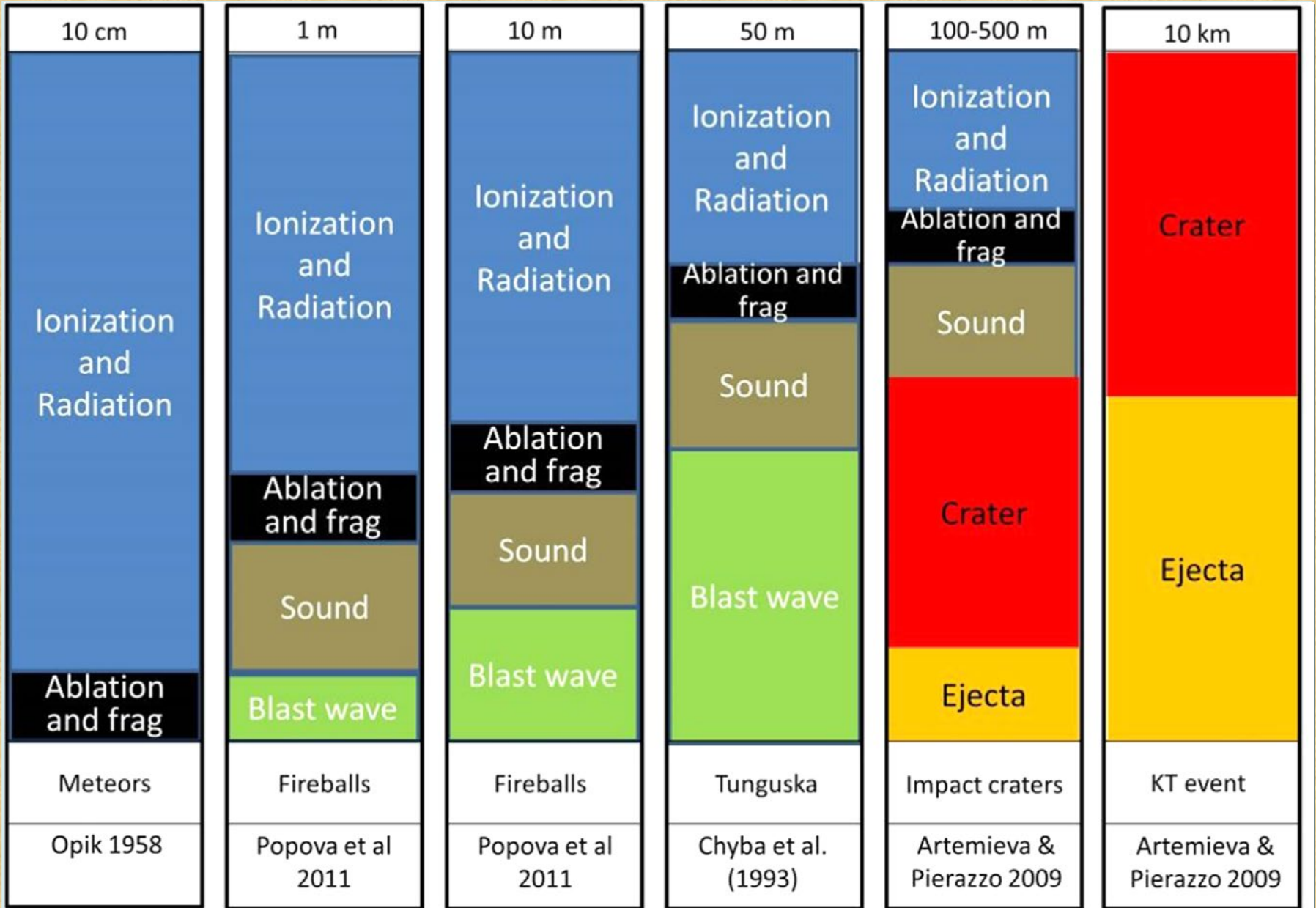
Строение, свойства

Моделирование

**Table 1 | Energy estimates for the Chelyabinsk airburst**

Technique	Best estimate (kt)	Range (kt)
Seismic	430	220–630
Infrasound (mean period)	600	350–990
US government sensor	530	450–640
Video-derived lightcurve	>470	



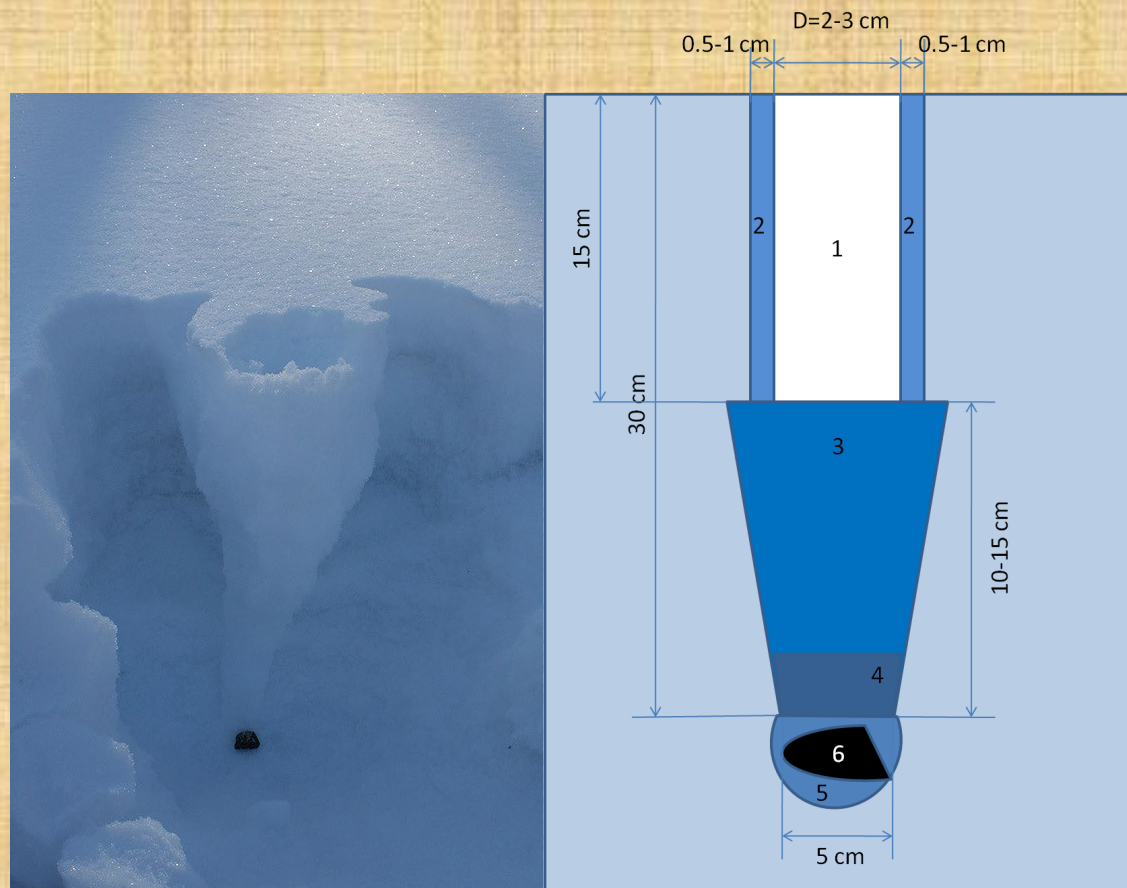


*Derek W.G. Sears (2016)*

# Структура «снежных морковок»



- 1 – канал в снегу
- 2 – тонкие стенки канала сложенные крупнокристаллическим рыхлым снегом
- 3-4 – морковка, 3 – крупнокристаллический плотный снег; 4- плотный мелкокристаллический снег
- 5 – оболочка плотного тонкокристаллического снега вокруг метеорита
- 6 - обломочный экземпляр метеорита



Фотография и зарисовки Кирилла Лоренца

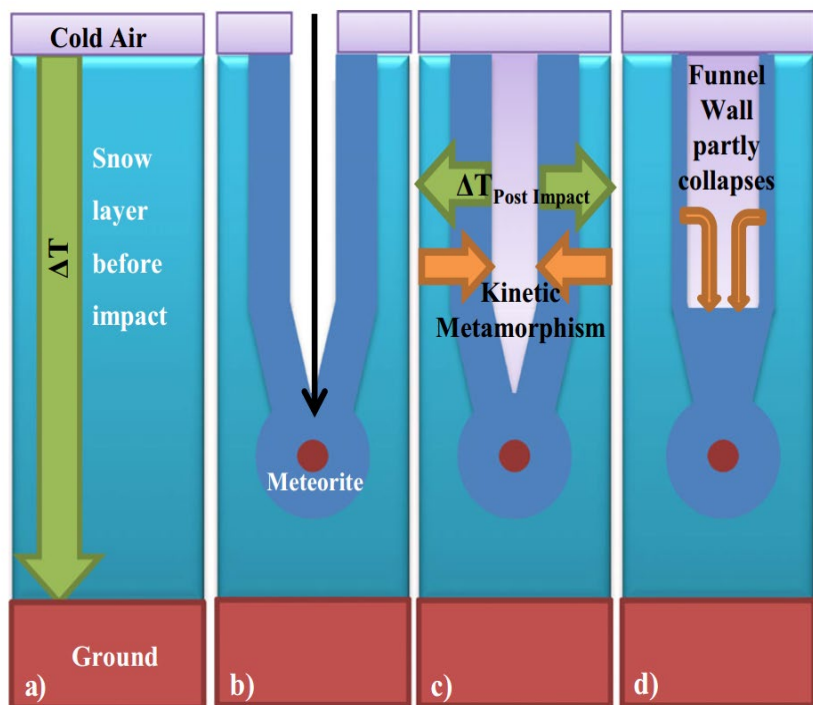
# «Снежные морковки», моделирование



*Meteoritics & Planetary Science* 52, Nr 5, 979–999 (2017)  
doi: 10.1111/maps.12831

## Snow carrots after the Chelyabinsk event and model implications for highly porous solar system objects

Robert LUTHER<sup>1\*</sup>, Natalia ARTEMIEVA<sup>1,2,3</sup>, Marina IVANOVA<sup>4</sup>, Cyril LORENZ<sup>4</sup>, and Kai WÜNNEMANN<sup>1</sup>

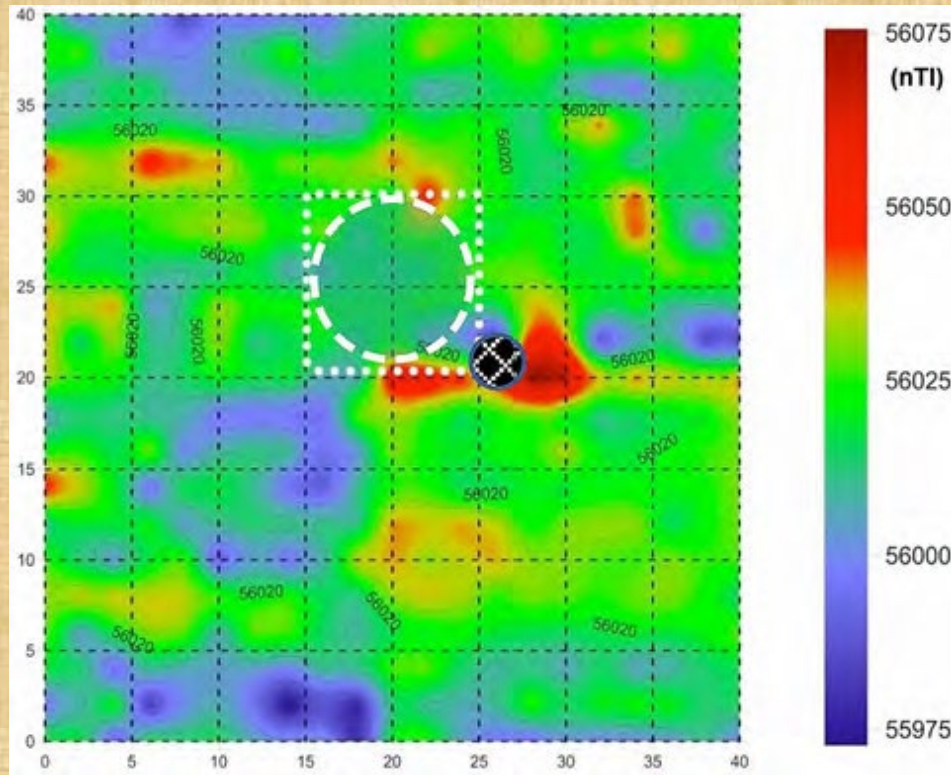


- Время падения фрагментов значительно дольше, чем время остывания;
- Скорость при падении в снег 30-90 м/с;
- При падении в пушистый снег  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;
- Нагрев от трения в снегу менее 0,5 гр ;
- Температурный градиент;
- Укрупнение и падение снежинок;
- Холодное уплотнение
- Механизм проникновения – снежный плуг: метеорит уплотняет снег перед собой, плотный снег «обтекает» метеорит

16.10.2013,  
озеро Чебаркуль



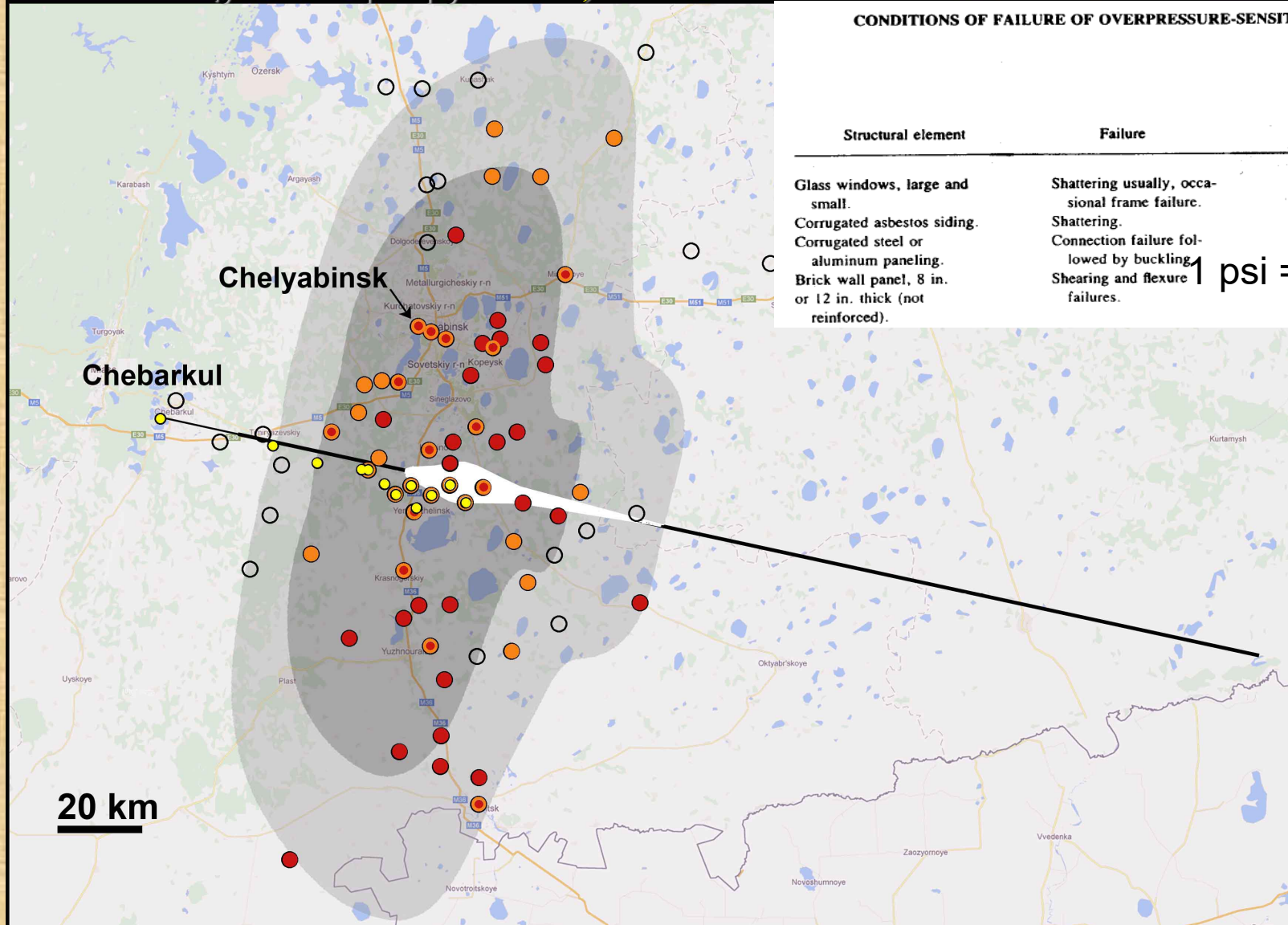
# Магнитная съемка в окрестностях полыни на озере Чебаркуль



- А.В. Овчаренко, Щапов В.А. (ИГФ УрО РАН): в результате комплексных геофизических съёмок обнаружено основное тело метеорита «Челябинск» на глубине 6-10 м.
- НИЛ квантовой магнитометрии ФТИ: надежды мало
- Н.Э. Мурзин (Алеут): наличие крупной массы крайне сомнительно.

# Челябинский болид отличается следующим:

впервые в обозримое историческое время ударная волна от торможения космического тела в атмосфере пришла на густонаселенную местность и вызвала ощутимые разрушения;



## CONDITIONS OF FAILURE OF OVERPRESSURE-SENSITIVE ELEMENTS

Structural element	Failure	Approximate side-on peak overpressure (psi)
Glass windows, large and small.	Shattering usually, occasional frame failure.	0.5- 1.0
Corrugated asbestos siding.	Shattering.	1.0- 2.0
Corrugated steel or aluminum paneling.	Connection failure followed by buckling.	1.0- 2.0
Brick wall panel, 8 in. or 12 in. thick (not reinforced).	Shearing and flexure failures.	1.0- 2.0

1 psi = 6890 Pa

# Экспериментальная бабочка ( спецсектор ИФЗ)

- Два вида взрыва: цилиндрический и сферический
- Разные углы наклона, разные соотношения энергий
- Лес из кусков проволоки
- Бабочка!

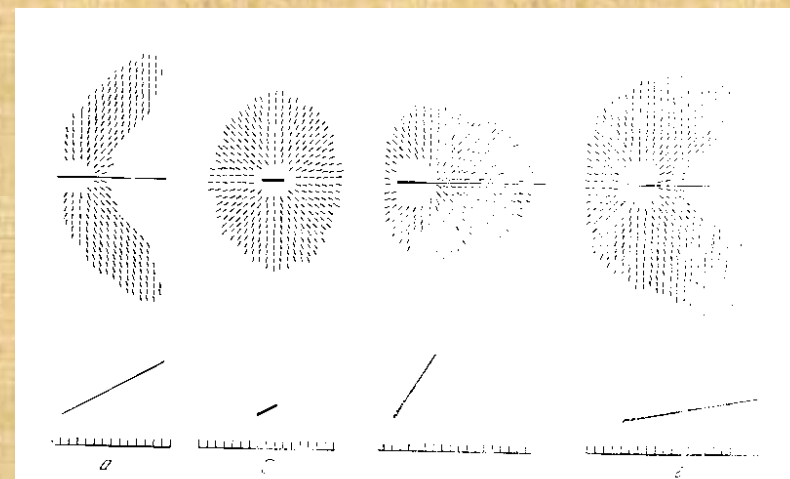
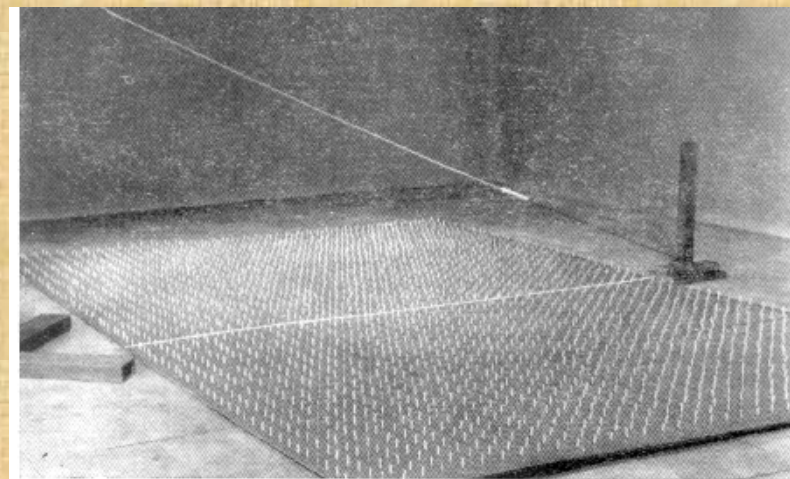
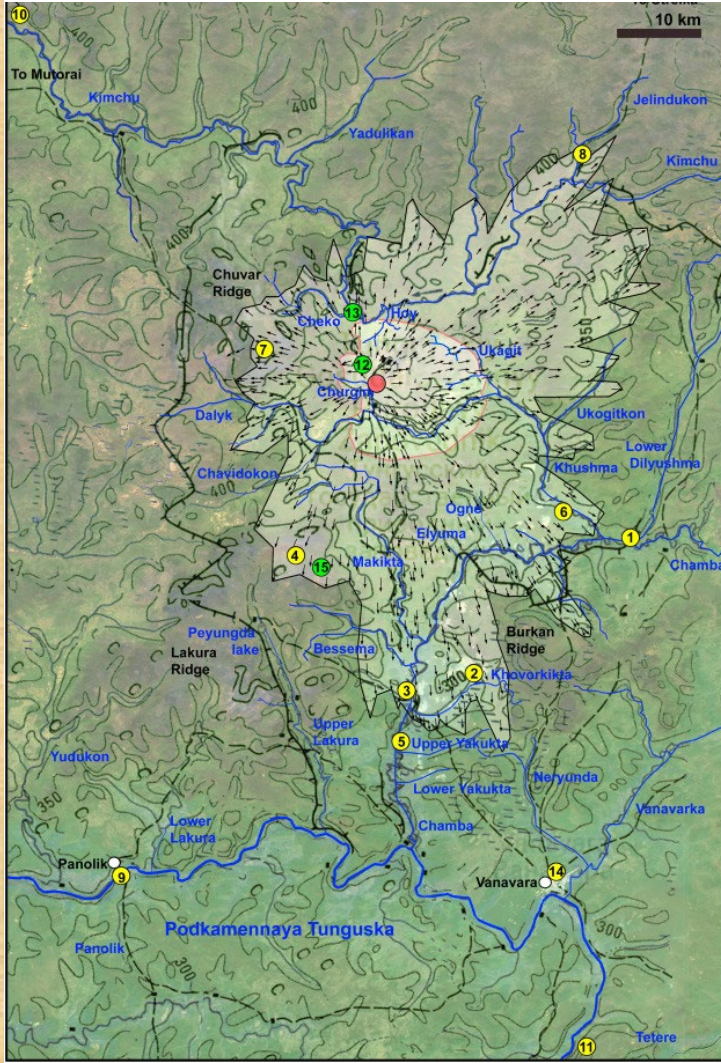


Рис. 29. Схема и результаты модельных опытов над макетом тайги. Внизу показана схема опыта (вид сбоку), сверху соответственно результат взрыва (вид сверху). *a*—шнур без усиления на конце; *b*—короткий отрезок заряда; *в*—шнур с усилением на конце с большим углом наклона к поверхности; *г*—шнур с усилением на конце с малым углом наклона к поверхности

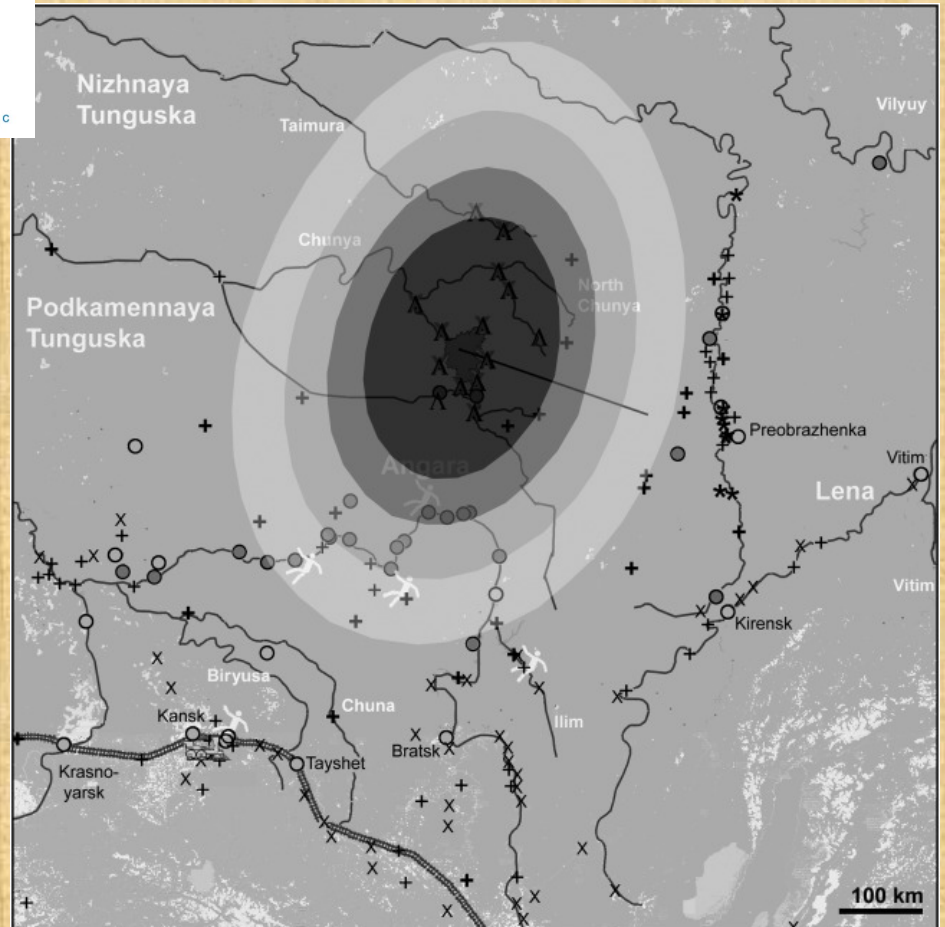
*Zotkin and Tsikulin 1966*

## Tunguska eyewitness accounts, injuries, and casualties

Peter Jenniskens <sup>a</sup>, Olga P. Popova <sup>b</sup>, Dmitry O. Glazachev <sup>b</sup>, Elena D. Podobnaya <sup>b</sup>, Anna P. Kartashova <sup>c</sup>



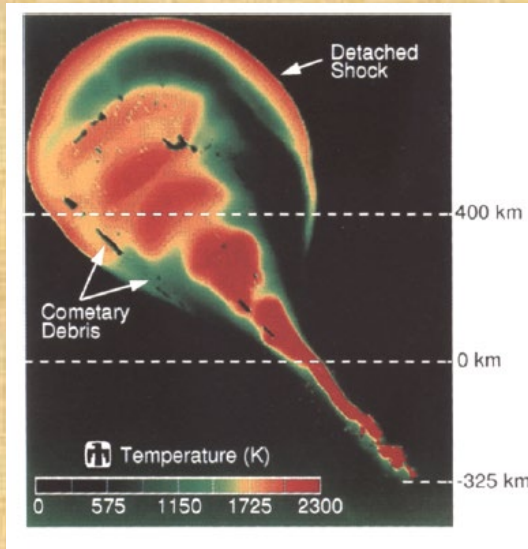
# Мощность взрыва (Тунгуска)



airburst model (12 Mt, 2000 kg/m<sup>3</sup>, 25°  
entry angle, 27 km/s entry speed).  
Contours correspond to (from dark to light):  
1500, 1000, 700 and 500 Pa

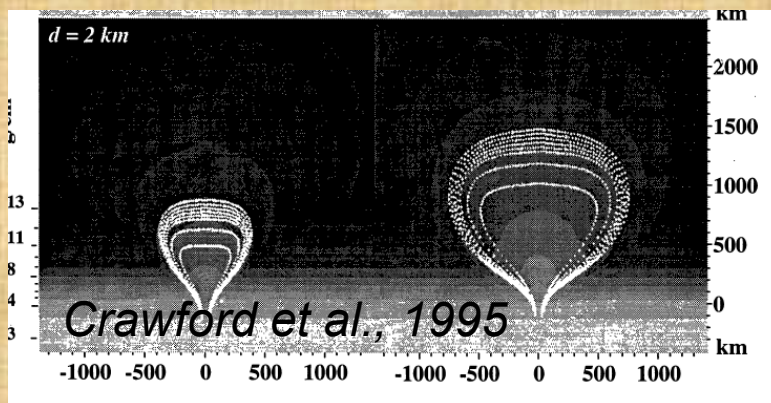


# ПЛЮМ – новое слово?

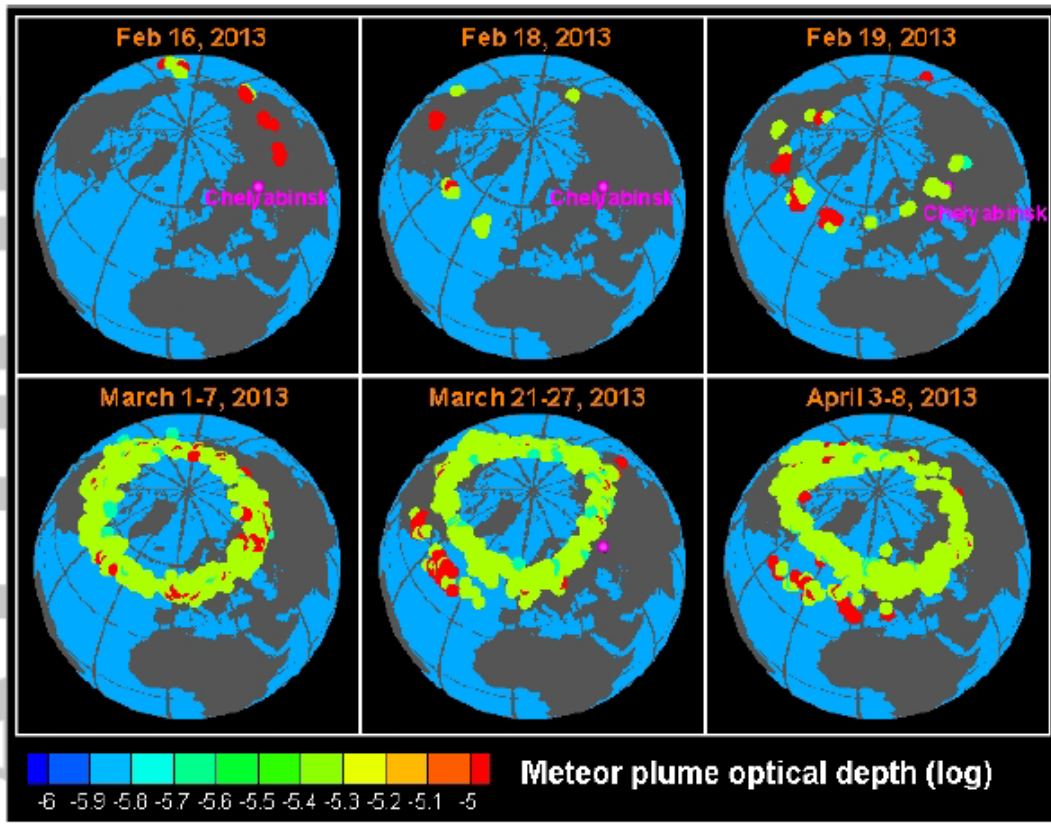


*Crawford et al., 1994, 1995*

- Попытка воспроизвести эффекты при столкновении кометы ШЛ 9 с Юпитером (1994)
- След в атмосфере
  - Горячий и плавучий
  - Смесь ударника и воздуха
- Плюм
  - Ранняя стадия: движение вдоль следа вверх
  - Поздняя стадия: коллапс, возмущения в атмосфере, распространение облака на мезосферных высотах



# Наблюдения со спутника



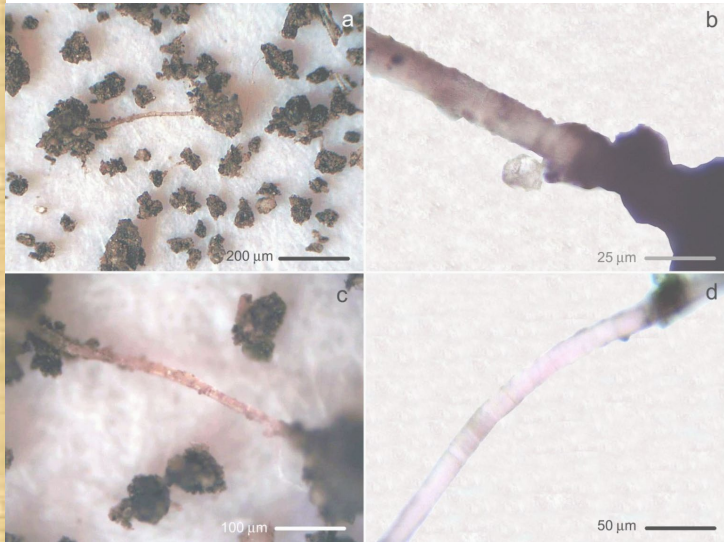
The Ozone Mapping Profiler Suite (OMPS) Limb Profiler (LP) on the NASA/NOAA NPP/Suomi satellite.  
Sensitivity  $3 \cdot 10^{-6}$  1/km

Высота: 30-40 км  
Размер частиц от 0.5 to 0.02 мкм  
Скорость оседания:  
90м/день

# Кристаллы углерода и силикатные нити в метеоритной пыли.

Pele's hairs and exotic multiply twinned graphite closed-shell microcrystals in meteoritic dust of Chelyabinsk superbolide

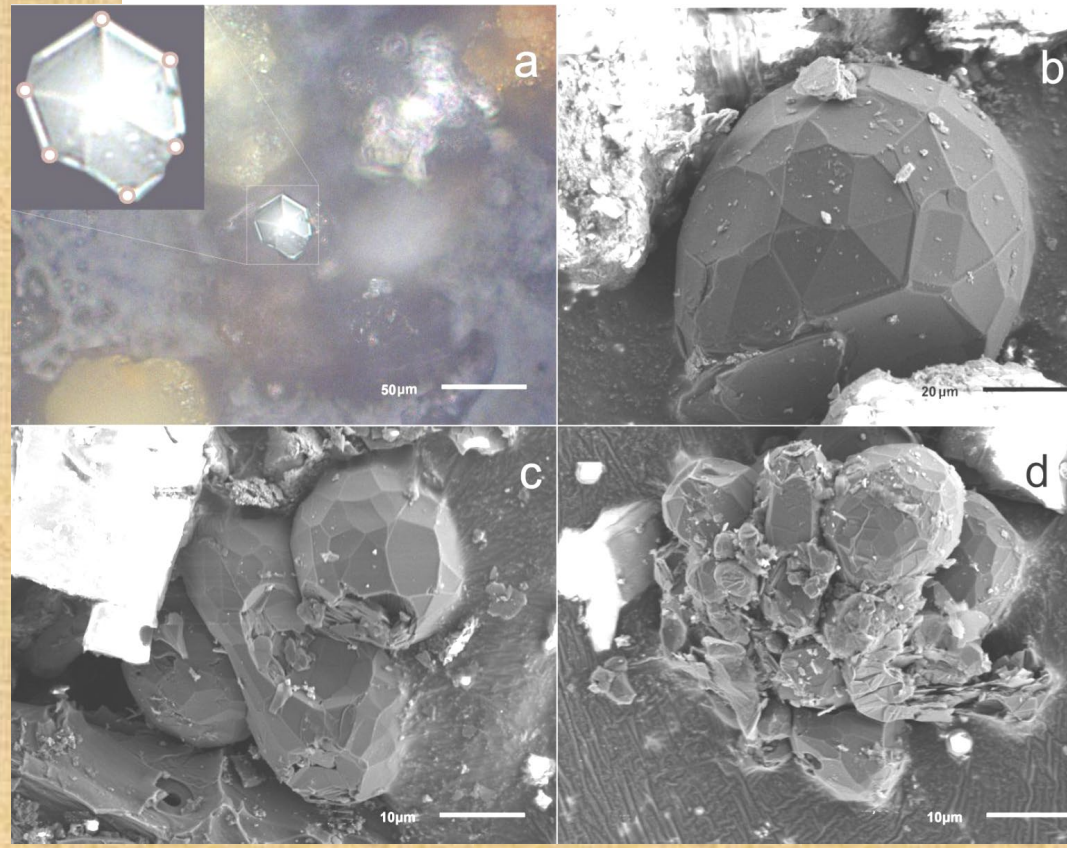
Sergey Taskaev<sup>(a,b,c)\*</sup>, Konstantin Skokov<sup>(d)</sup>, Vladimir Khovaylo<sup>(a,b)</sup>, Wolfgang Donner<sup>(d)</sup>, Tom Faske<sup>(d)</sup>, Alexander Dudorov<sup>(a)</sup>, Nick Gorkavyi<sup>(e,f)</sup>, Galina Savosteenko<sup>(a)</sup>, Alexander Dyakonov<sup>(c)</sup>, Woohyeon Baek<sup>(g)</sup>, Artem Kuklin<sup>(g)</sup>, Pavel Avramov<sup>(g)</sup> and Oliver Gutfleisch<sup>(d)</sup>



Article

## Structure and Raman Spectra of Exotic Carbon Microcrystals from Meteoritic Dust of Chelyabinsk Superbolide

Galina Savosteenko <sup>1</sup>, Sergey Taskaev <sup>1,2</sup> and Pavel Avramov <sup>3,\*</sup>



Eur. Phys. J. Plus (2022) 137:562 <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02768-7>

Exotic carbon microcrystals in meteoritic dust of the Chelyabinsk superbolide: experimental investigations and theoretical scenarios of their formation

Sergey Taskaev<sup>1,2,3,a</sup>, Konstantin Skokov<sup>4</sup>, Vladimir Khovaylo<sup>2,b</sup>, Wolfgang Donner<sup>4</sup>, Tom Faske<sup>4</sup>, Alexander Dudorov<sup>1</sup>, Nick Gorkavyi<sup>5</sup>, Dmitry S. Muratov<sup>2,6</sup>, Galina Savosteenko<sup>1</sup>, Alexander Dyakonov<sup>7</sup>, Woohyeon Baek<sup>8</sup>, Artem Kuklin<sup>8</sup>, Pavel Avramov<sup>8</sup>, Oliver Gutfleisch<sup>4</sup>

# Оксигидрооксиды Fe: столкновение с ядром кометы 930 млн лет.

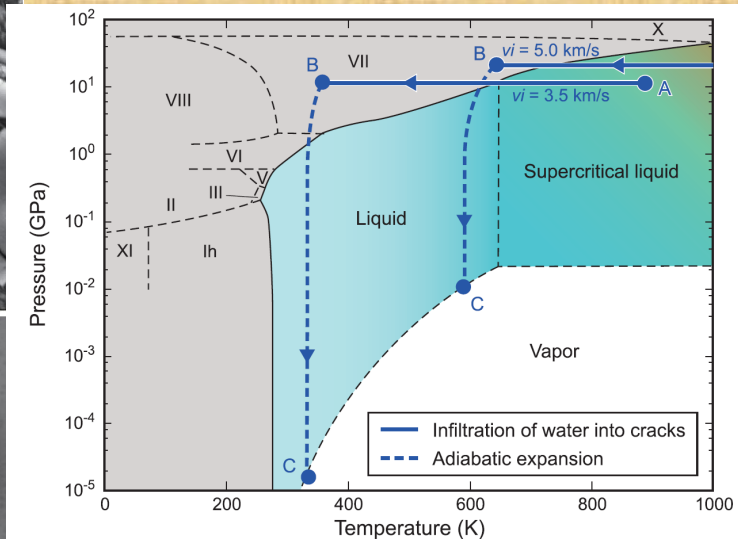
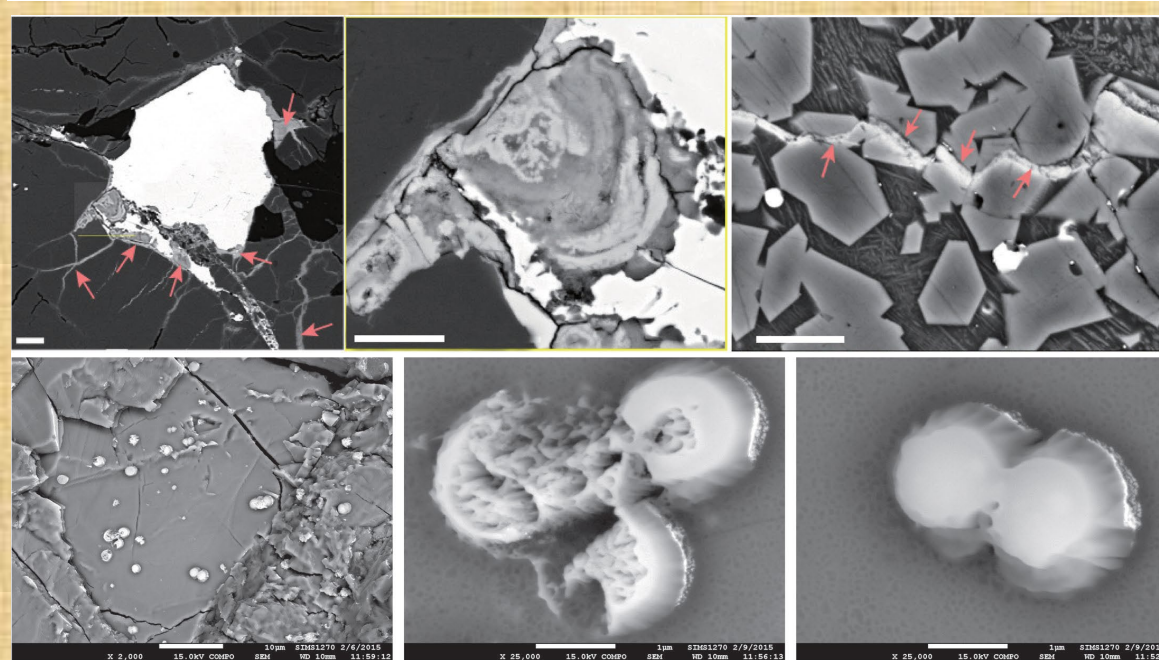
No. 4]

Proc. Jpn. Acad., Ser. B 95 (2019)

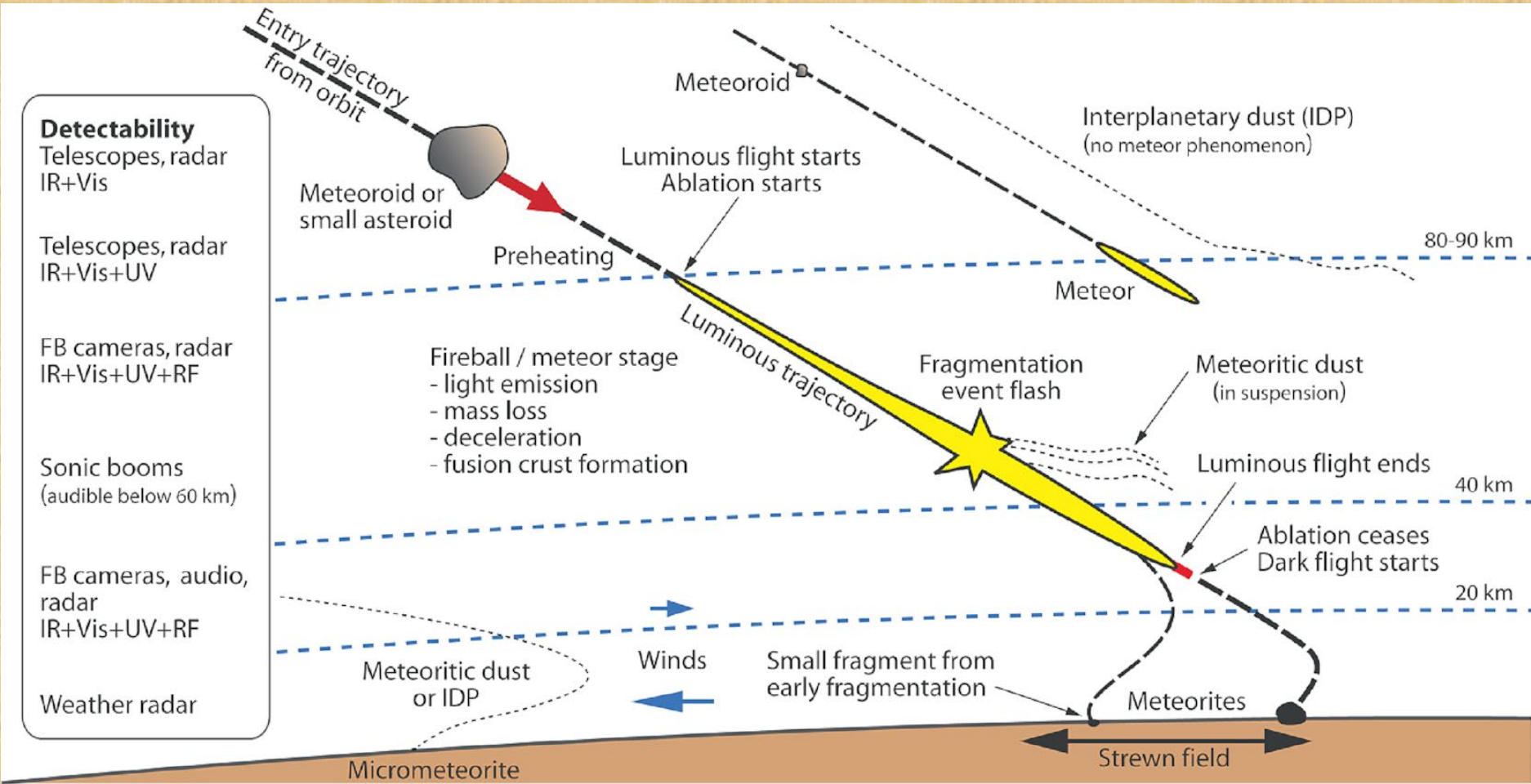
165

## Hypervelocity collision and water-rock interaction in space preserved in the Chelyabinsk ordinary chondrite

By Eizo NAKAMURA,<sup>\*1,†</sup> Tak KUNIHIRO,<sup>\*1</sup> Tsutomu OTA,<sup>\*1</sup> Chie SAKAGUCHI,<sup>\*1</sup> Ryoji TANAKA,<sup>\*1</sup> Hiroshi KITAGAWA,<sup>\*1</sup> Katsura KOBAYASHI,<sup>\*1</sup> Masahiro YAMANAKA,<sup>\*1</sup> Yuri SHIMAKI,<sup>\*1</sup> Gray E. BEBOUT,<sup>\*1,\*2</sup> Hitoshi MIURA,<sup>\*3</sup> Tetsuo YAMAMOTO,<sup>\*4</sup> Vladimir MALKOVETS,<sup>\*1</sup> Victor GROKHOVSKY,<sup>\*5</sup> Olga KOROLEVA<sup>\*6,\*7</sup> and Konstantin LITASOV<sup>\*8</sup>



# Этапы и явления при входе метеороида в атмосферу

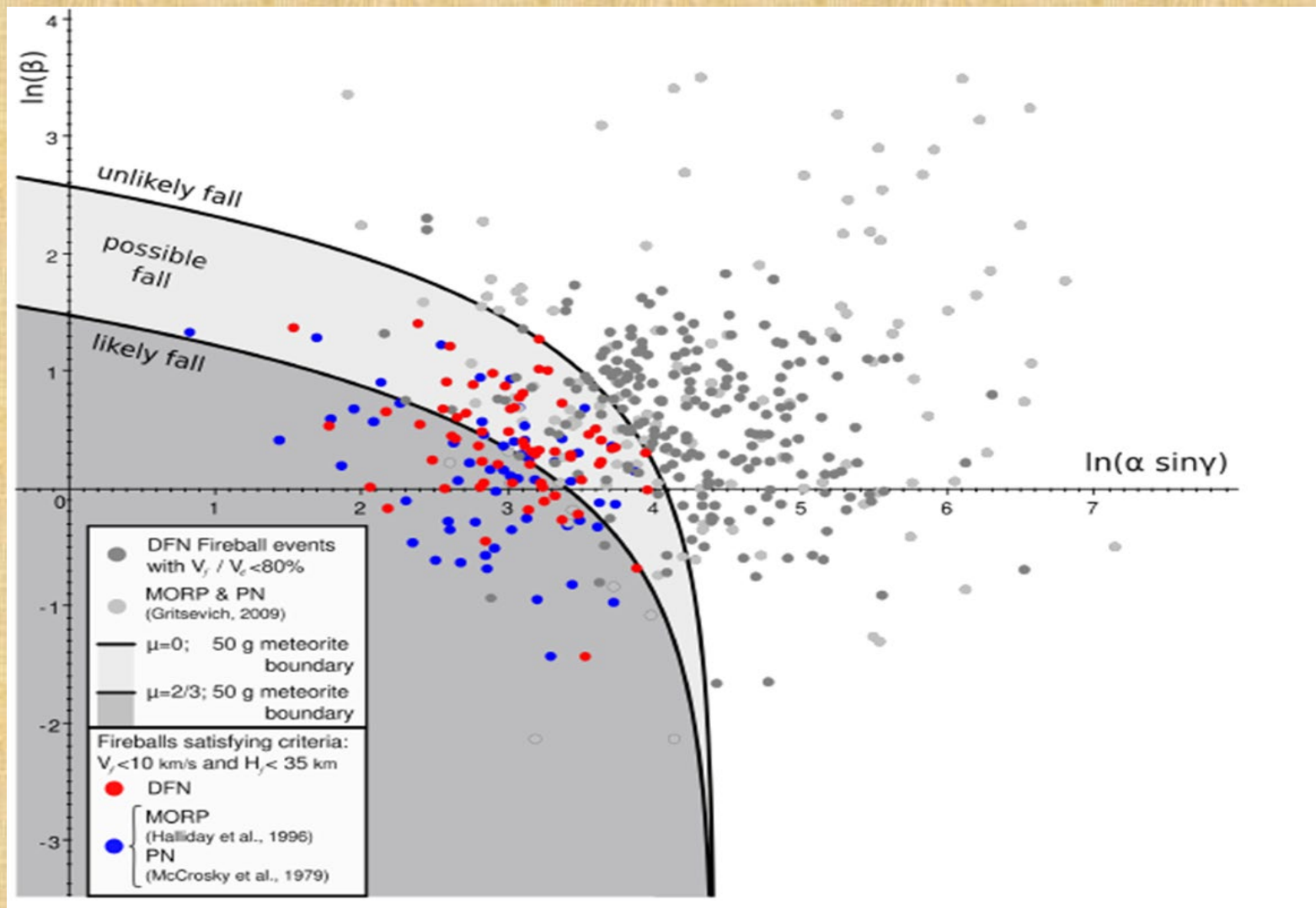


## Анализ болидов в атмосфере Земли с помощью диаграмм $\alpha$ - $\beta$

- ▶ Баллистический коэффициент  $\alpha = \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0 S_e}{M_0 \sin \gamma}$
- ▶ Параметр уноса массы  $\beta = (1 - \mu) \frac{c_h V_0^2}{2 c_d H^*}$

где  $M_0$ ,  $V_0$  – масса и скорость тела в момент входа в атмосферу,  $S_e$  – изначальная площадь поперечного сечения тела,  $c_d$  – коэффициент сопротивления,  $c_h$  – коэффициент теплообмена,  $H^*$  – энтальпия сублимации,  $h_0$  – высота однородной атмосферы,  $\gamma$  – местный угол траектории с горизонтом,  $\mu$  – параметр изменения формы,  $\rho_0$  – плотность атмосферы на уровне моря.

# Анализ болидов в атмосфере Земли с помощью диаграмм $\alpha$ - $\beta$



# Визуализация Кольского болида, 19.04.2014

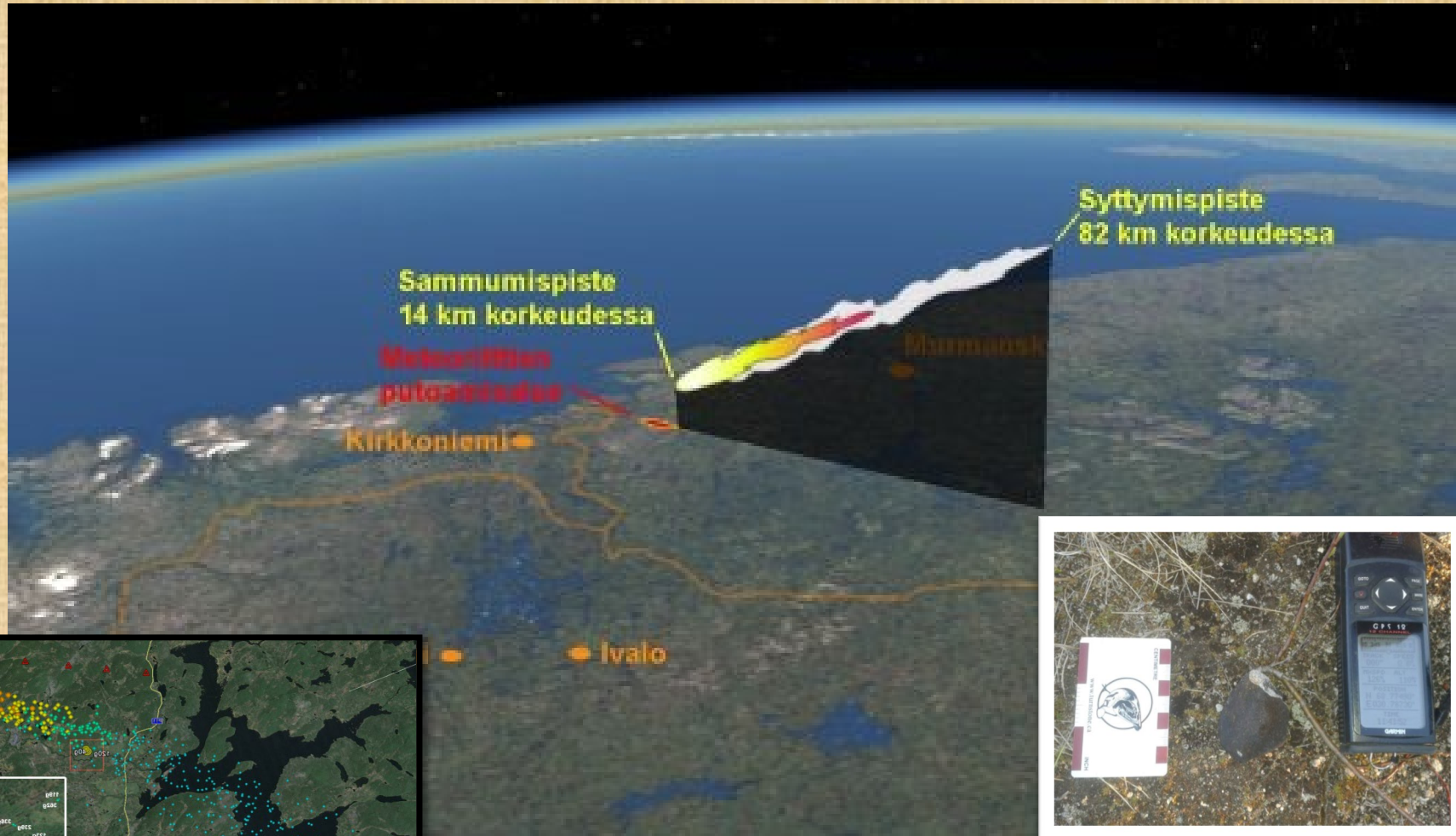
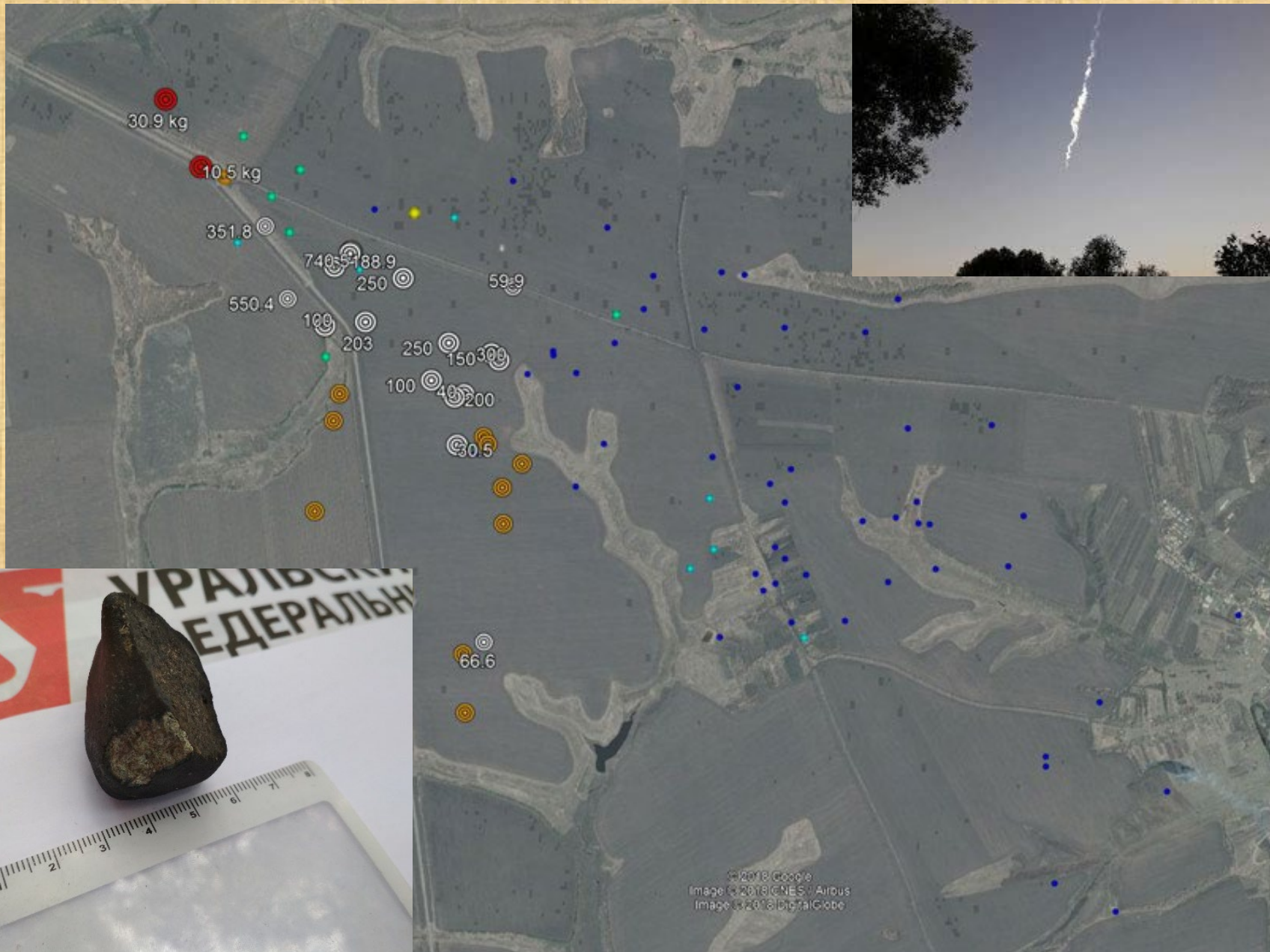


Illustration by Mikko Suominen / "Tähdet ja Avaruus"



# 21.06.2018 Озерки (Ozerki)

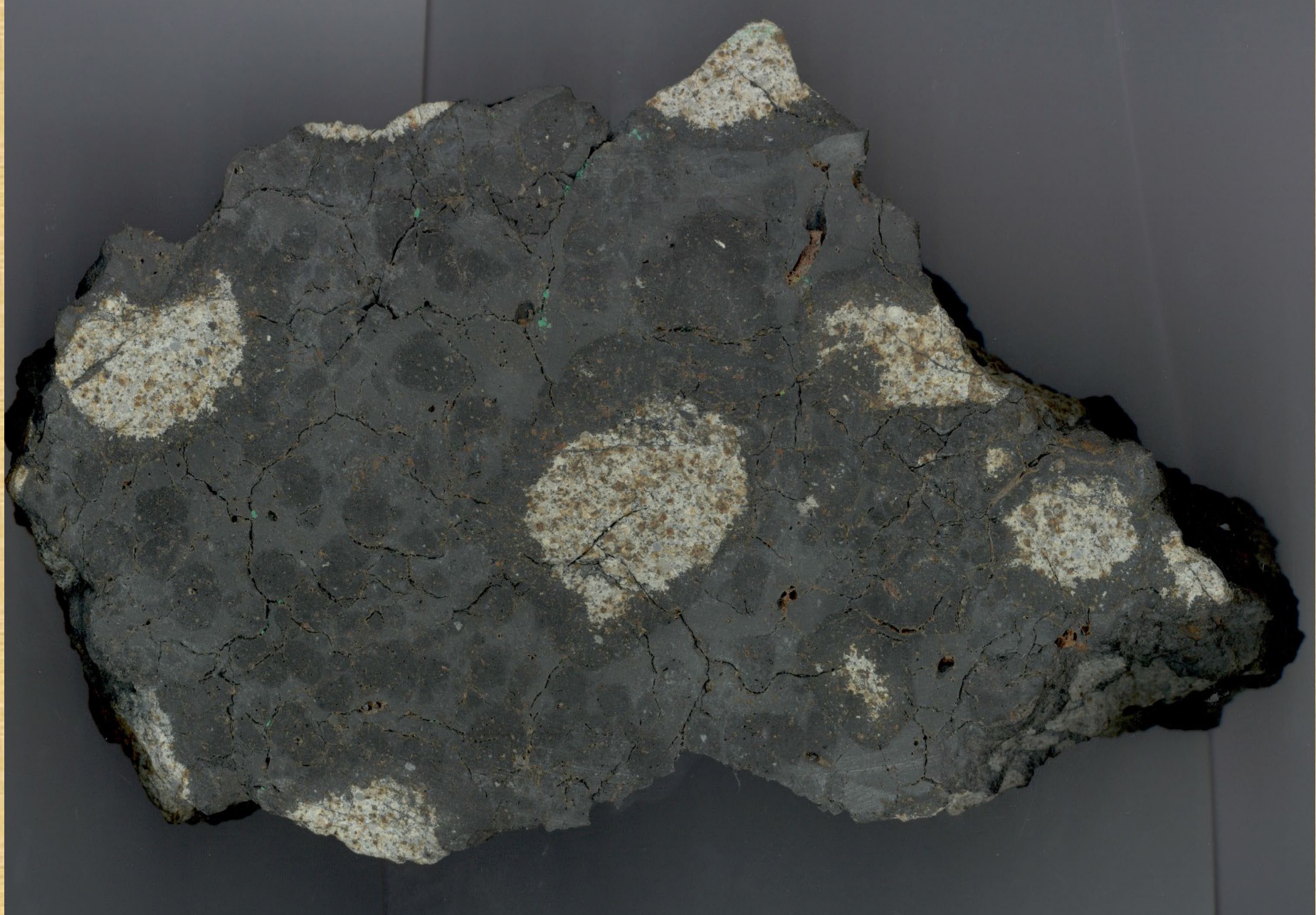




## *От события до регистрации метеорита Озерки*

<i>Падение метеорита</i>	<i>21.06.2018</i>	<i>04:47</i>
<i>Расчёт траектории падения</i>	<i>21-24.06.2018</i>	
<i>Находка первого фрагмента</i>	<i>24.06.2018</i>	
<i>Лабораторные исследования</i>	<i>28.06-05.07.2018</i>	
<i>Регистрация метеорита Озёрки</i>	<i>20.07.2018</i>	

# Макро-текстура метеорита Челябинск



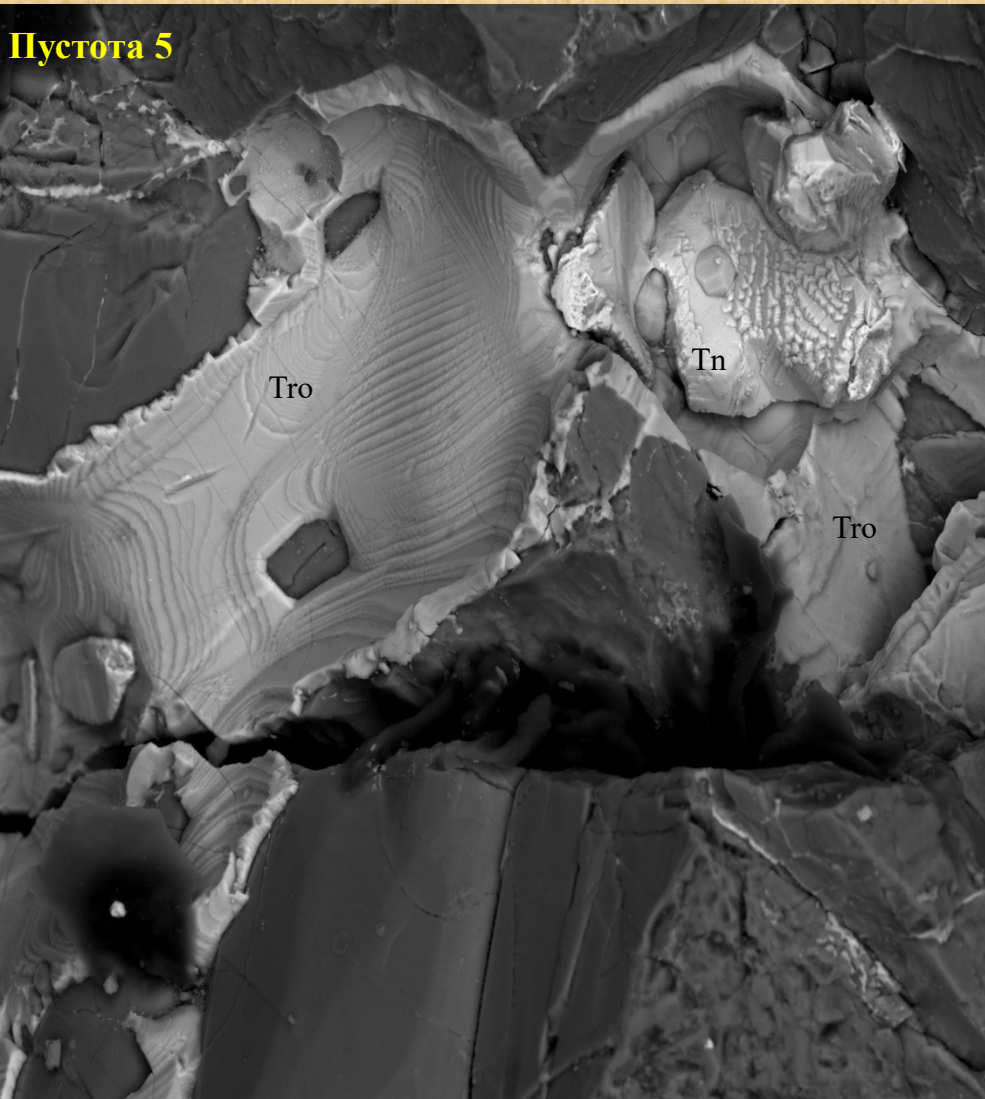
# Минеральные ассоциации в метеорите Челябинск

LL5, S4-S6/7, W0

Исходный хондрит (светлая литология)	Импактные прожилки	Темная литология («импактный расплав»)	Кора оплавления	Гипергенные ассоциации
Формирование родительского тела	Столкновение с другими космическими объектами	Столкновение с очень крупным космическим объектом или прохождение вблизи Солнца	Вхождение в атмосферу Земли	Вторичные преобразования на Земле
Аккреция	Локальное плавление исходного хондрита	Частичное или полное плавление исходного хондрита и импактных прожилков	Полное плавление исходного хондрита и других ранних ассоциаций, абляция вещества с поверхности	Преобразование фаз всех предыдущих ассоциаций, в первую очередь металла и сульфидов
оливин $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , ортопироксен $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ , Cr-диопсид $CaMgSi_2O_6$ , плагиоклаз $(Na,Ca)Al_2Si_2O_8$ , камасит $\alpha-(Fe,Ni)$ , тэнит $\gamma-(Fe,Ni)$ , тетратэнит $FeNi$ , троилит $FeS$ , пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$ , хромит $(Fe,Mg)Cr_2O_4$ , ильменит $FeTiO_3$ , мерриллит $Ca_9NaMg(PO_4)_7$ , хлорапатит $Ca_5(PO_4)_3Cl$ , самородная медь $Cu$ , хаксонит $(Fe,Ni)_{23}C_6$ , графит $C$ . Хондры	оливин $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , пироксены, камасит $\alpha-(Fe,Ni)$ , тэнит $\gamma-(Fe,Ni)$ , троилит $FeS$ , альбит $NaAlSi_3O_8$ , калишпат $KAlSi_3O_8$ , жадеит $NaAlSi_2O_6$ , полевошпатовое стекло. <b>Металл-сульфидные глобулы</b> Хондры отсутствуют	оливин $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , пироксены, мартенсит $\alpha'-(Fe,Ni)$ , тэнит $\gamma-(Fe,Ni)$ , троилит $FeS$ , пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$ , хромит $FeCr_2O_4$ , мерриллит $Ca_9NaMg(PO_4)_7$ , саркопсид $Fe^{2+}_3(PO_4)_2$ , графтонит $Fe^{2+}_3(PO_4)_2$ , галилеит $Na_3Fe^{2+}Fe^{2+}_{11}(PO_4)_9$ , ксенофиллит $Na_4Fe^{2+}_7(PO_4)_6$ , джонсомервиллит $Na_3CaFe_{11}(PO_4)_9$ , хладниит $Na_3CaMg_{11}(PO_4)_9$ , Cr-магнетит $Fe(Fe,Cr)_2O_4$ , полевошпатовое стекло. <b>Металл-сульфидные глобулы</b> <b>Фосфатные глобулы</b> Хондры отсутствуют	оливин $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , пироксены, самородный никель $Ni$ , троилит $FeS$ , пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$ , годлевскит $Ni_9S_8$ , хизлевудит $Ni_3S_2$ , хизлевудит $Ni_4S_3$ , аваруйт $Ni_2Fe-Ni_3Fe$ , Ni-Os-Ir-Pt-сплав, магнетит $FeFe_2O_4$ , Cr-Ni-магнетит $(Fe,Ni)(Fe,Cr)_2O_4$ , магнезиоферрит $MgFe_2O_4$ , маггемит $Fe_{0.67}Fe_2O_4$ , вюстит $FeO$ , бунзенит $NiO$ , оливин-пироксеновое стекло, полевошпатовое стекло. <b>Металл-сульфидные глобулы</b> Хондры отсутствуют	гидроксиды Fe гётит $FeO(OH)$ , хиббингит $Fe^{2+}_2(OH)_3Cl$ , гематит $Fe_2O_3$ , сидерит $FeCO_3$ , кальцит $CaCO_3$ , сульфаты

# Минералогия пустот

Пустота 5



View field: 160  $\mu\text{m}$

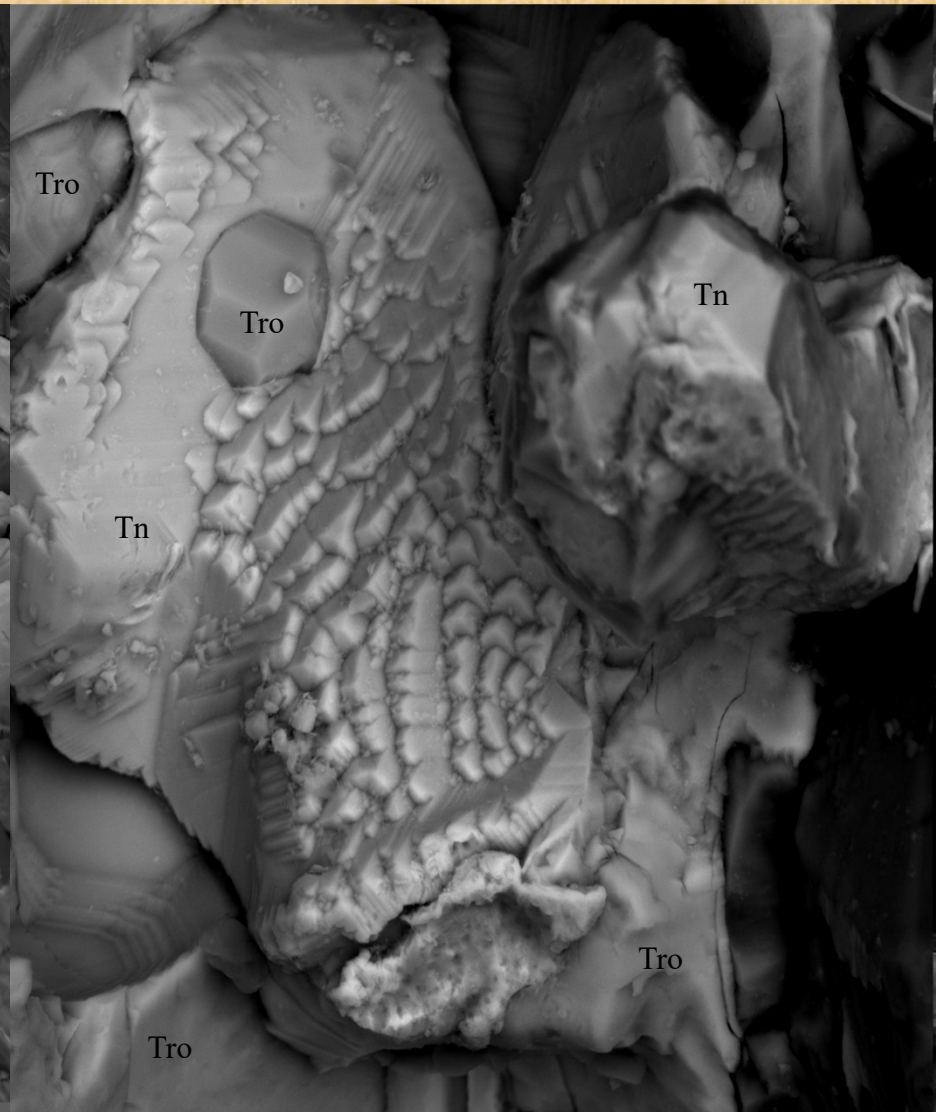
SEM MAG: 6.83 kx

SEM MAG: 6.83 kx

WD: 14.27 mm

Det: BSE, SE

Date(m/d/y): 06/04/13



View field: 44.2  $\mu\text{m}$

SEM MAG: 24.7 kx

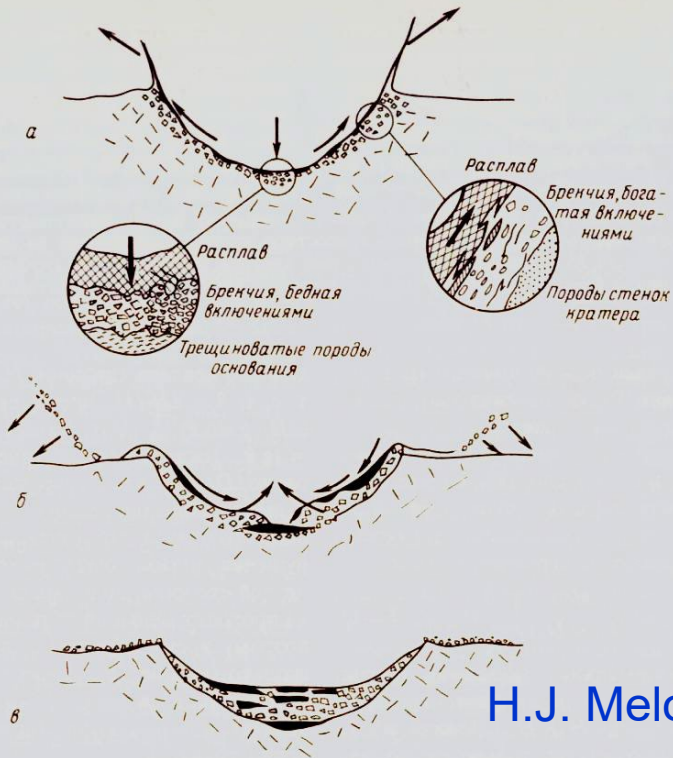
SEM MAG: 24.7 kx

WD: 15.00 mm

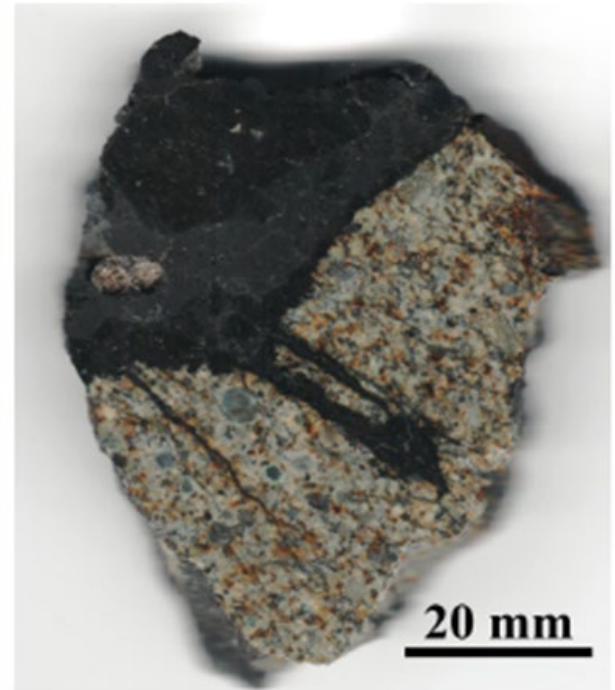
Det: BSE, SE

Date(m/d/y): 06/04/13

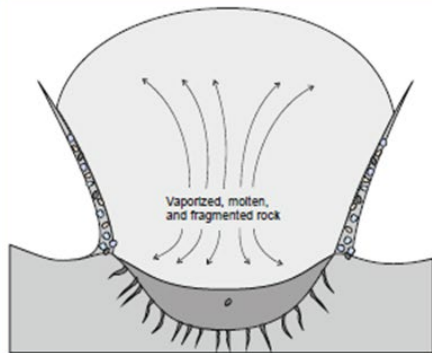
# Схема формирования брекчий в ударном кратере



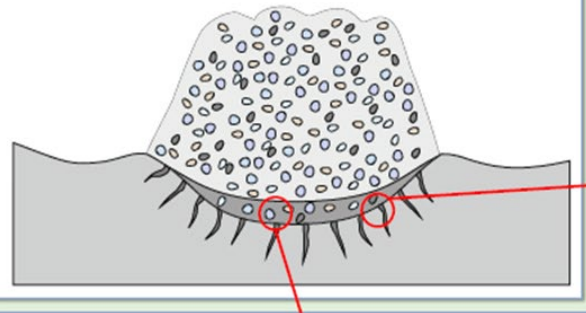
H.J. Melosh (1989)

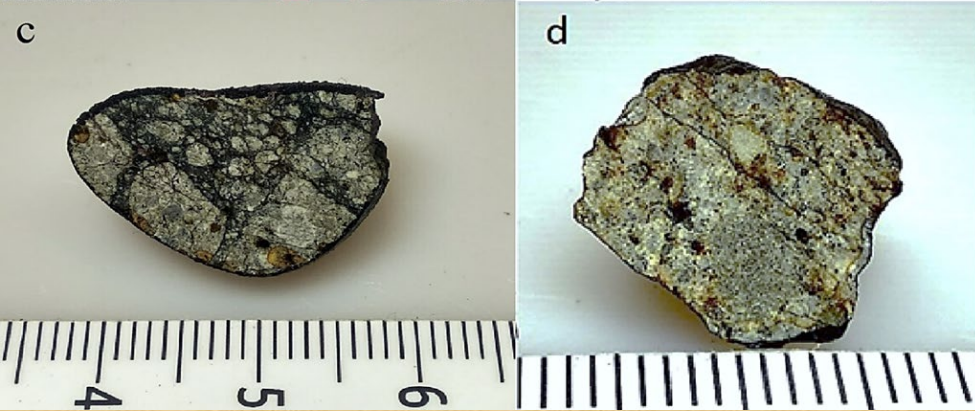
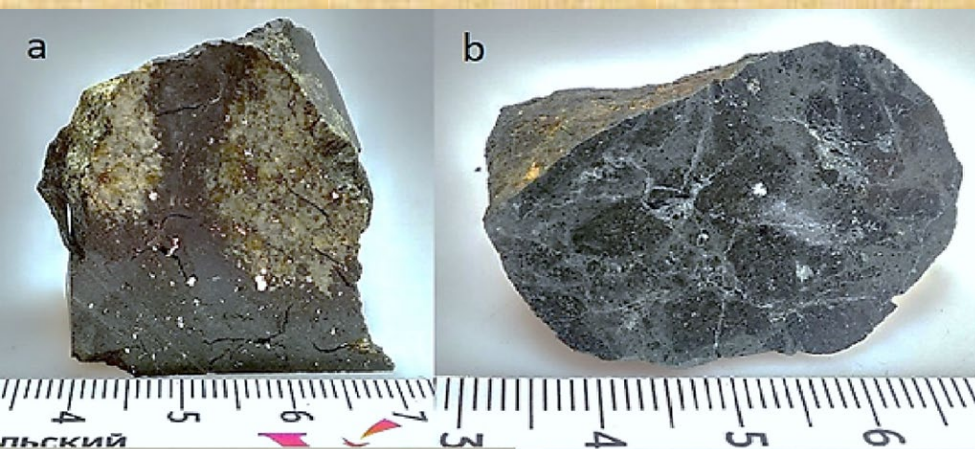


Sample with dyke: the crack filled with impact melt

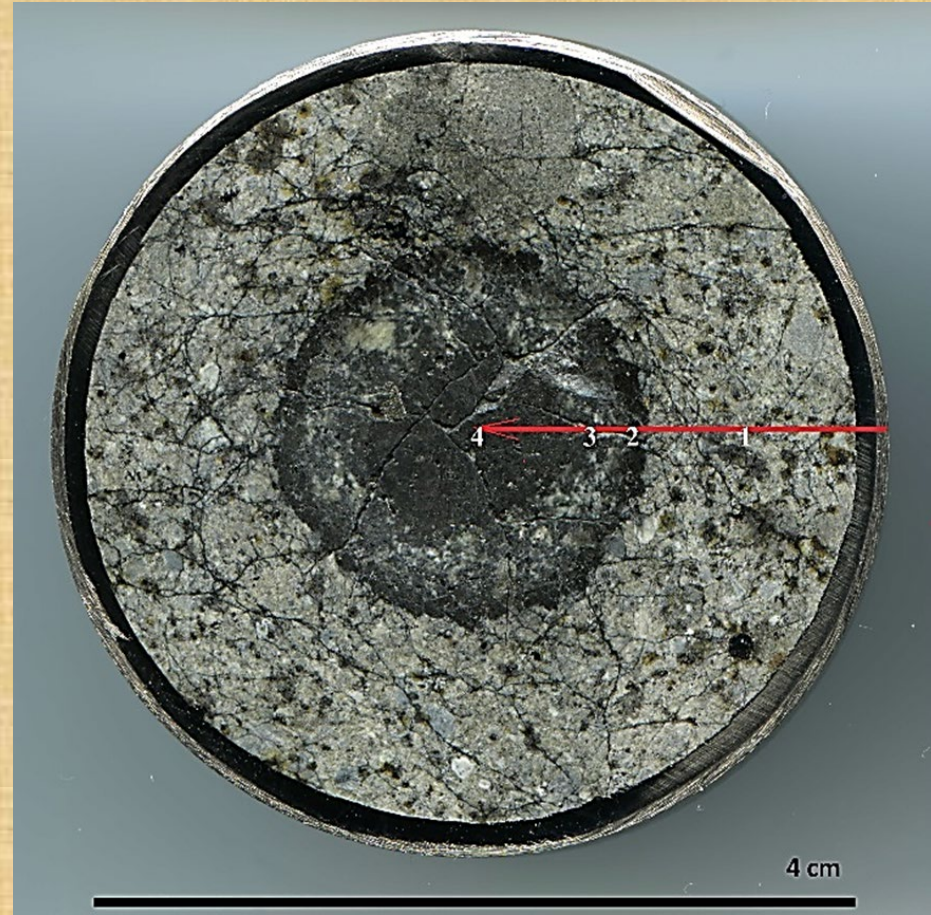


Collapse of secondary plum and deposition of material (after [6])





Литологии метеорита Челябинск до и после ударно-волнового нагружения исходного вещества.



# Разные литологии метеорита Челябинск LL5

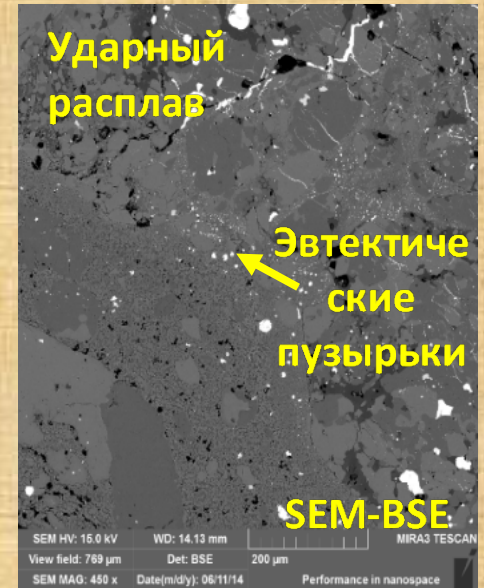
Литологии требуют различных условий формирования

№	Литология (структурная зона)	Атрибуты	Температура, °С	Скорость охлаждения °С/сек
1	Исходное вещество, светлая литология		<400	6°С/млн.лет
2	Ударные (сдвиговые) жилки	Капли металла и троилита	800-1200	
3	Расплав, серая зона темной литологии	Полный переплав	>1600	10
4	Конденсированные микрокристаллы	Дендриты металла	>1200	8
5	Черная зона, темная литология	Плавление троилита	800	
6	Кора плавления	Дендриты магнезиоферрита	До 2000	10 <sup>3</sup>
7	Смешанная литология	Потемнение матрицы	>1200	

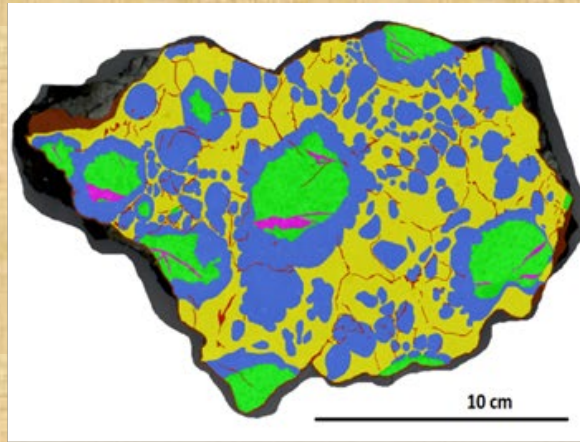
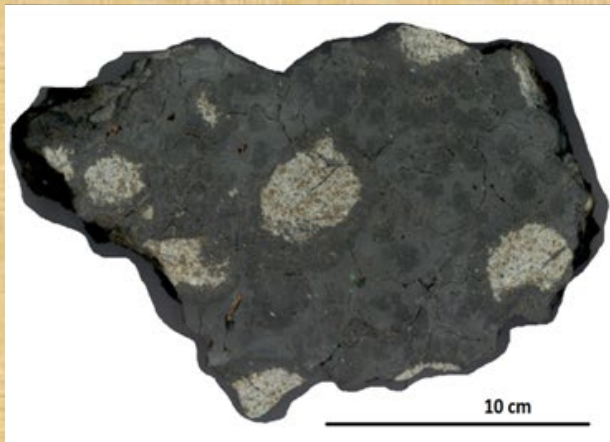
Все эти зоны были получены в эксперименте по нагружению сферически-сходящимися ударными волнами вещества исходной светлой литологии



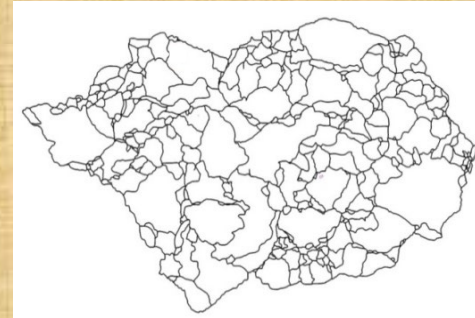
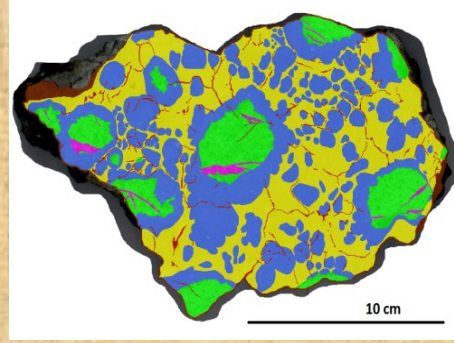
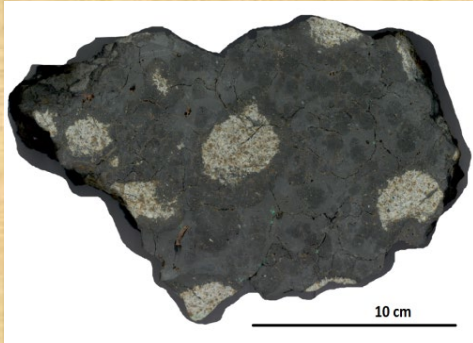
# Структура брекчии Челябинск LL5



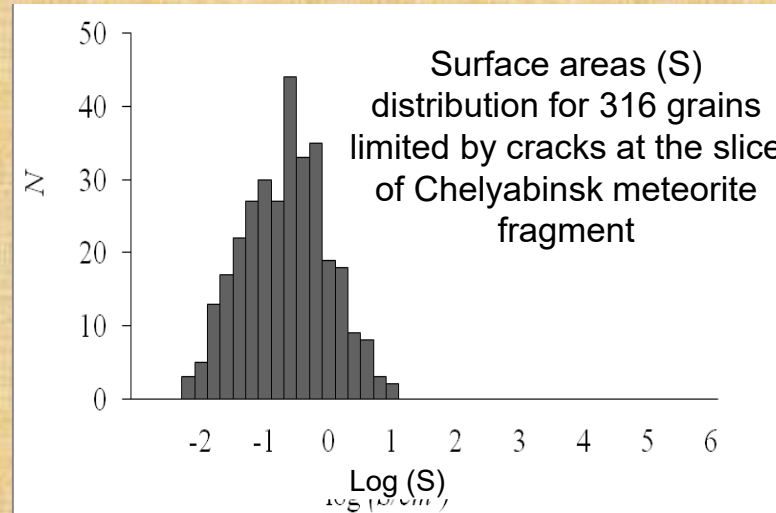
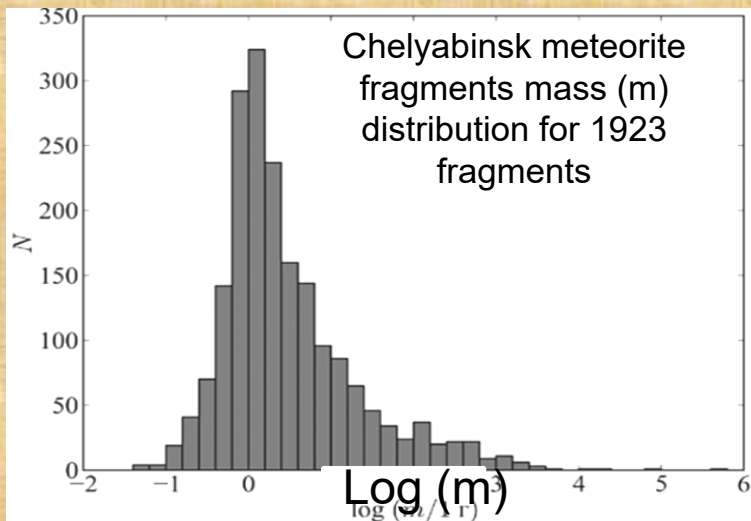
**Удар**



# FRACTURE STRUCTURE OF CHELYABINSK METEORITE BODY WITH DIFFERENT LITHOLOGY

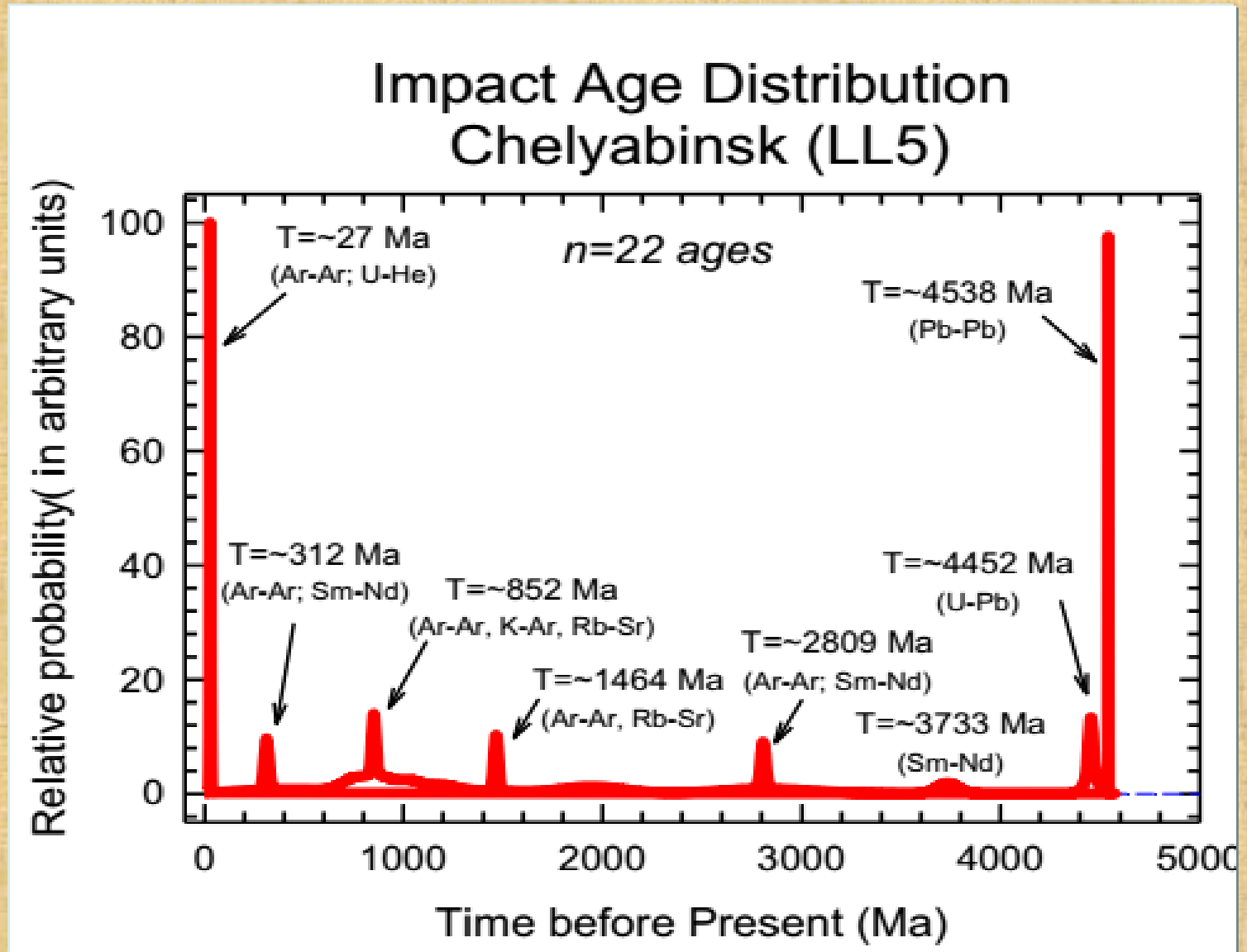


Crack analysis at the surface of the slice of Chelyabinsk meteorite fragment.



Mass distribution of Chelyabinsk fragments Badyukov et al. (2014) and distribution of surface areas of the grains limited by cracks at the slice modeling one fragment fracture.

# Хронология импактных событий



Righter, K., Abell, P., Agresti, D., Berger, E.L., Burton, A.S., Delaney, J.S., Fries, M.D., Gibson, E.K., Haba, M.K., Harrington, R., et al., 2015. Mineralogy, petrology, chronology, and exposure history of the Chelyabinsk meteorite and parent body. *Meteorit Planet Sci* 50, 1790–1819.

# Хронология импактных событий



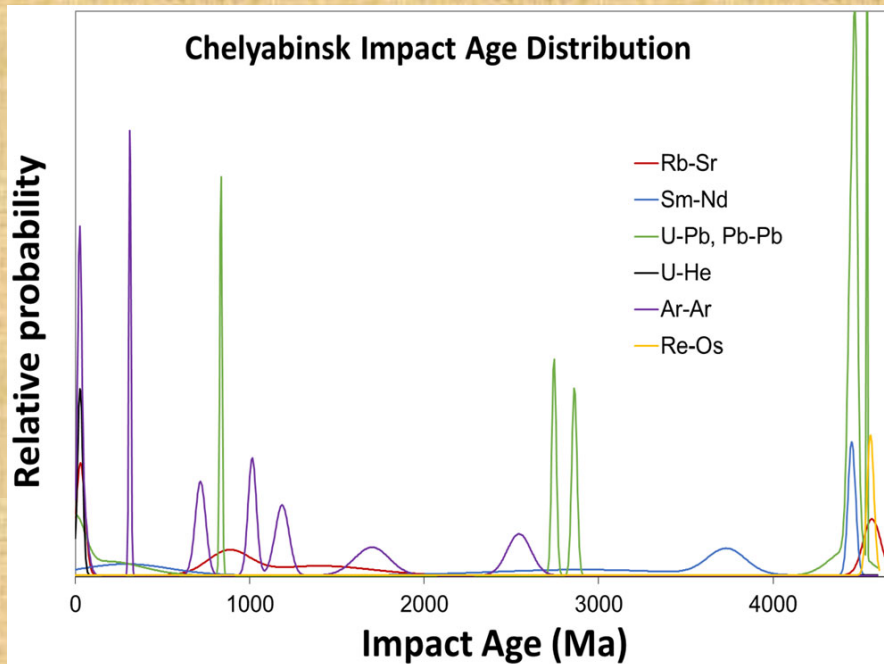
Meteoritics & Planetary Science 57, Nr 12, 2276–2288 (2022)  
doi: 10.1111/maps.13927

## Report

### Ar-Ar and U-Pb ages of Chelyabinsk and a re-evaluation of its impact chronology

Sky P. BEARD<sup>1,2,3,4\*</sup>, Timothy D. SWINDLE<sup>2,3</sup>, Thomas J. LAPEN<sup>5</sup>, and David A. KRING<sup>2,6</sup>

### Chelyabinsk Impact Age Distribution



Revised impact age distribution suggested by this work:

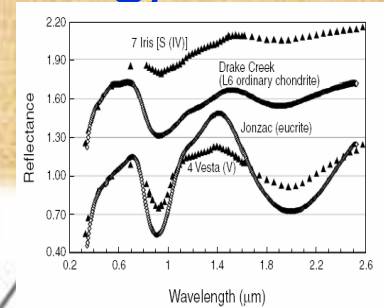
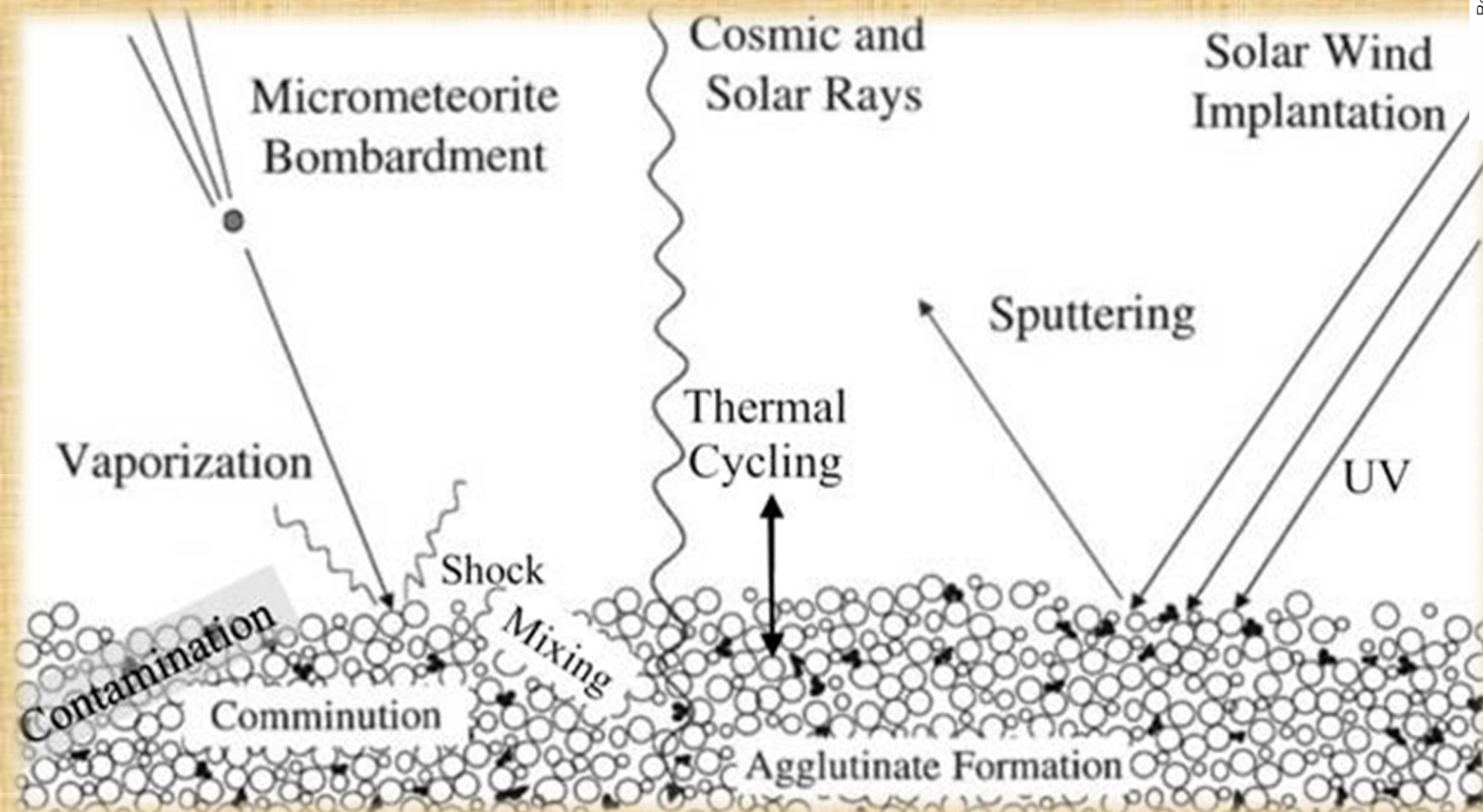
- Formation age  $\sim 4560$  Ma (Re-Os, Rb-Sr),
- an early energetic impact  $\sim 4450$  Ma (Pb-Pb, U-Pb),
- an energetic impact not seen in other LL chondrites at  $\sim 2500$ – $2800$  Ma (Sm-Nd, U-Pb, Ar-Ar),
- followed by the most recent impact event  $\sim 30$  Ma (Rb-Sr, U-He, U-Pb, Sm-Nd, and Ar-Ar).

Based on quality and context of data, there is also possible evidence of an impact at  $\sim 3700$  Ma (Sm-Nd) and at  $\sim 1000$  Ma (Ar-Ar, Rb-Sr).

*Ю. Костицын (ГЕОХИ): Sm-Nd и Rb-Sr изотопные системы в образцах с несколькими литологиями полностью нарушены и оценки времени импакта не согласуются между собой.*

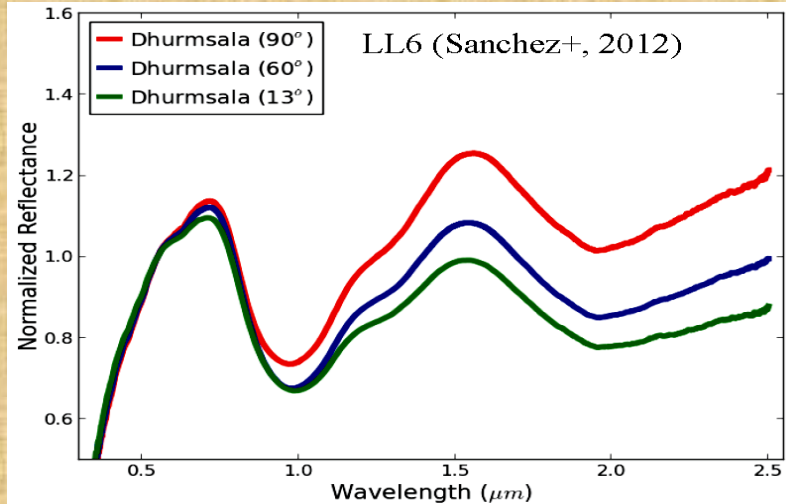
*Что мы знаем об истории? - сформировался рано, но жизнь была тяжелая.*

# Космическое выветривание (Space weathering)

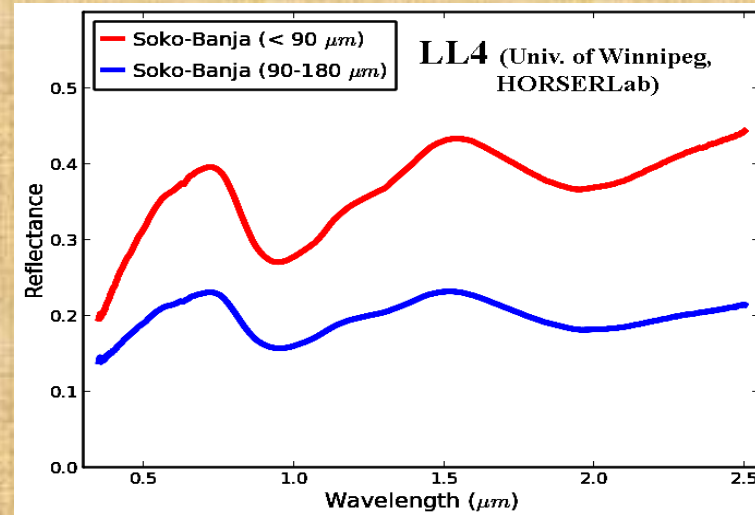


# Критические факторы при интерпретации спектров отражения астероидов

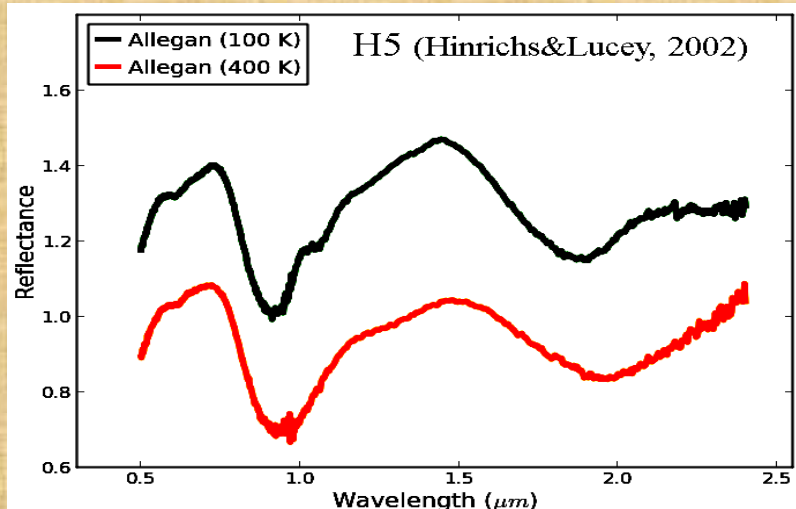
## 1) Разные фазовые углы



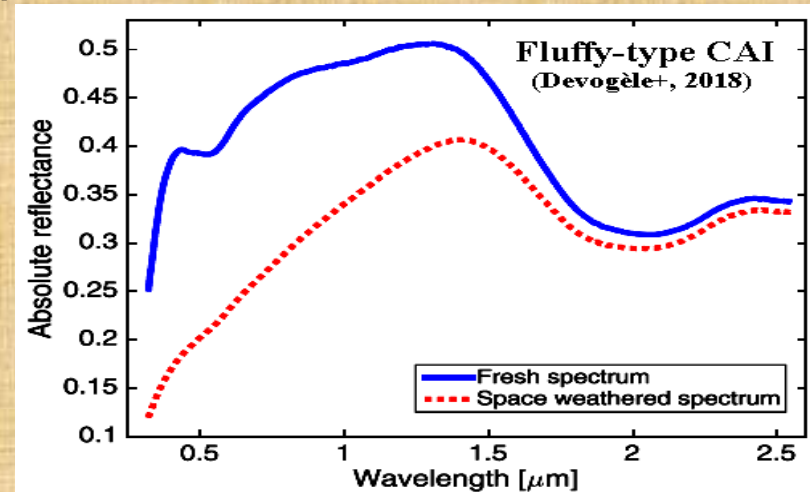
## 2) Разный размер частиц



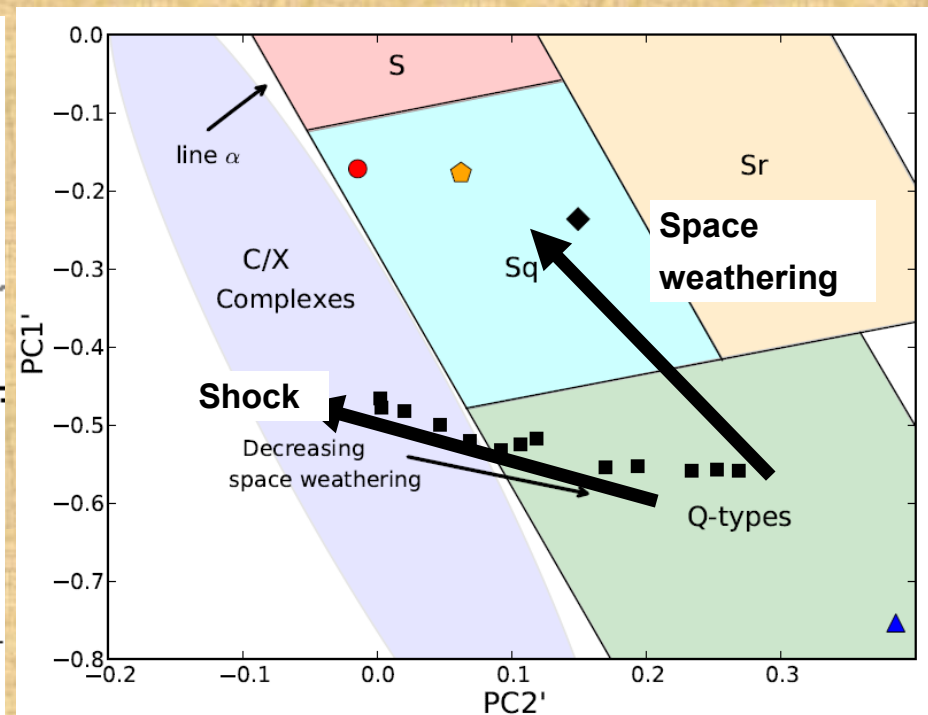
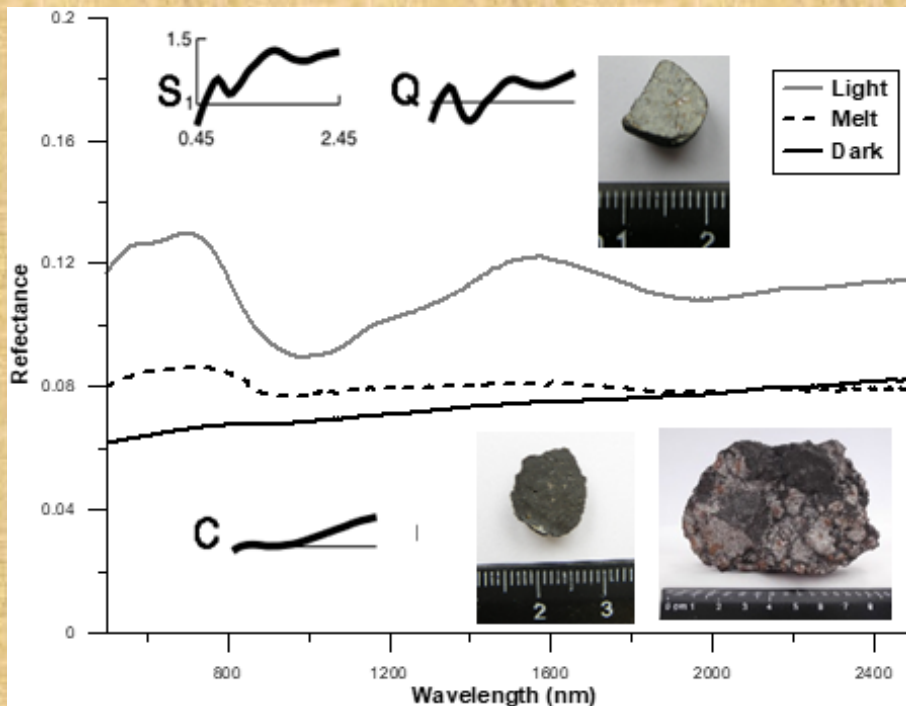
## 3) Перепад температур



## 4) Космические воздействия



# Челябинск LL5, различные ЛИТОЛОГИИ




# Заключение

Челябинское событие 15.02.2013 года – наиболее яркое и мощное событие на нашем веку с падением небольшого небесного тела на Землю.

Богатый научный материал позволил по-новому взглянуть на:

- ✓ представления о астероидно-кометной опасности;
- ✓ фрагментацию метеороида в атмосфере;
- ✓ падение в снег, образование «снежных морковок»;
- ✓ падение основной массы в озеро;
- ✓ оценка Тунгусского явления;
- ✓ образование минералов в космосе и на Земле;
- ✓ расчет траекторий болидов;
- ✓ оценка вероятности падения метеоритов;
- ✓ формирование темной литологии в метеоритах;
- ✓ причины разрушения и катастрофической фрагментации;
- ✓ хронологию импактных событий;
- ✓ причины «потемнения» астероидов.





**Благодарю за  
внимание!**