



Srážky kosmických těles se Zemí: případ Čeljabinsk

Jiří Borovička

*Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.
Ondřejov*

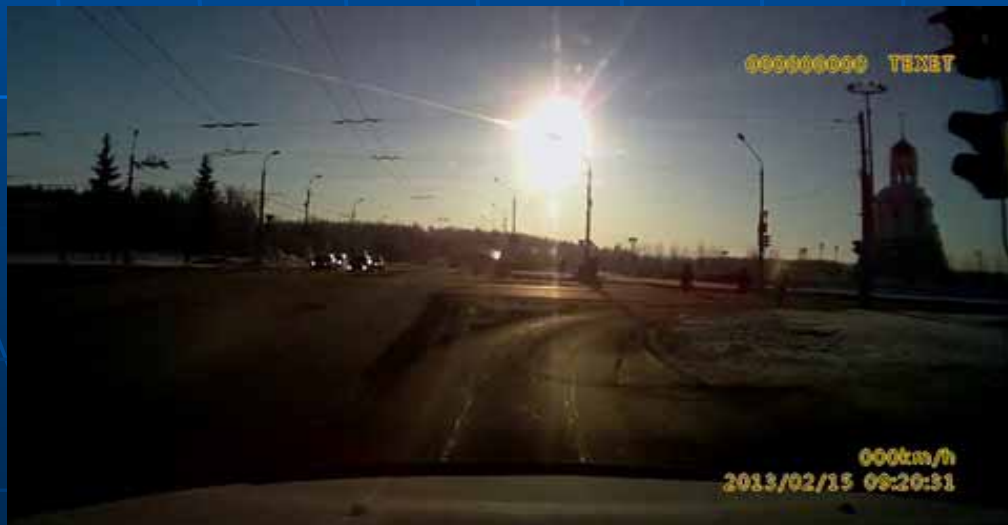
Kde je Čeljabinsk?



- 3200 km od Prahy
- 55. rovnoběžka, 61. poledník
- 1,1 mil. obyvatel
- vojenský a jiný průmysl

Ráno 15. února 2013

- V 9:20 místního času, v době východu Slunce, proletěl nad Čeljabinskou oblastí velmi jasný bolid
- Zaznamenan stovkami videokamer



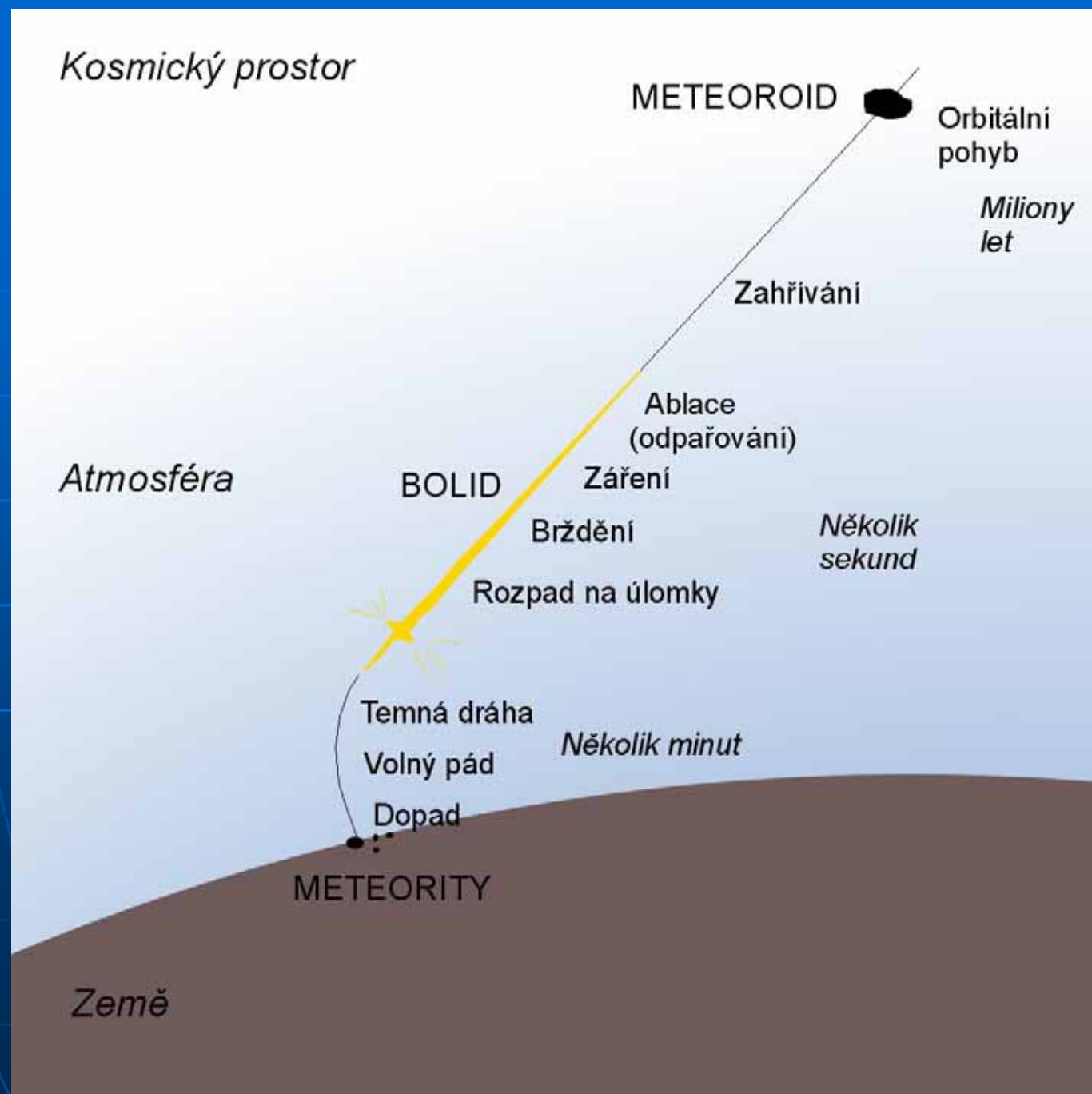
podívejte se na videa ...

Jiné bolidy náhodně zachycené videokamerami

- Peekskill (1992)
- Morávka (2000)
- Neuschwanstein (2002, *jen stín a zvuk*)
- Košice (2010)

Location:
Johnstown, PA
©John Derr,
120 Wissinger Rd.,
Windber, PA
USA
15963
ph: 814-266-8088





Jak moc byl Čeljabinsk výjimečný?

- Mohutný prachový oblak v atmosféře
- Mohutná rázová vlna
- Škody na budovách (okna, dveře, jedna zřícená střecha)
- Zranění lidé



podívejte se na videa ...

Prachová stopa ze země ...



... a z meteorologických družic

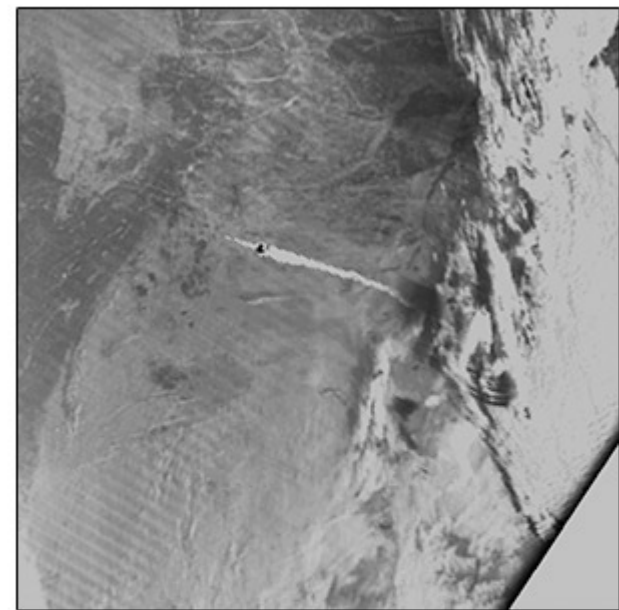
(několik minut až několik hodin po bolidu)

■ Geostacionární

- Meteosat 7,8,9,10 (*Evropa*)
- MTSAT 2 (*Japonsko*)
- Elektro-L (*Rusko*)
- COMS (*Jižní Korea*)

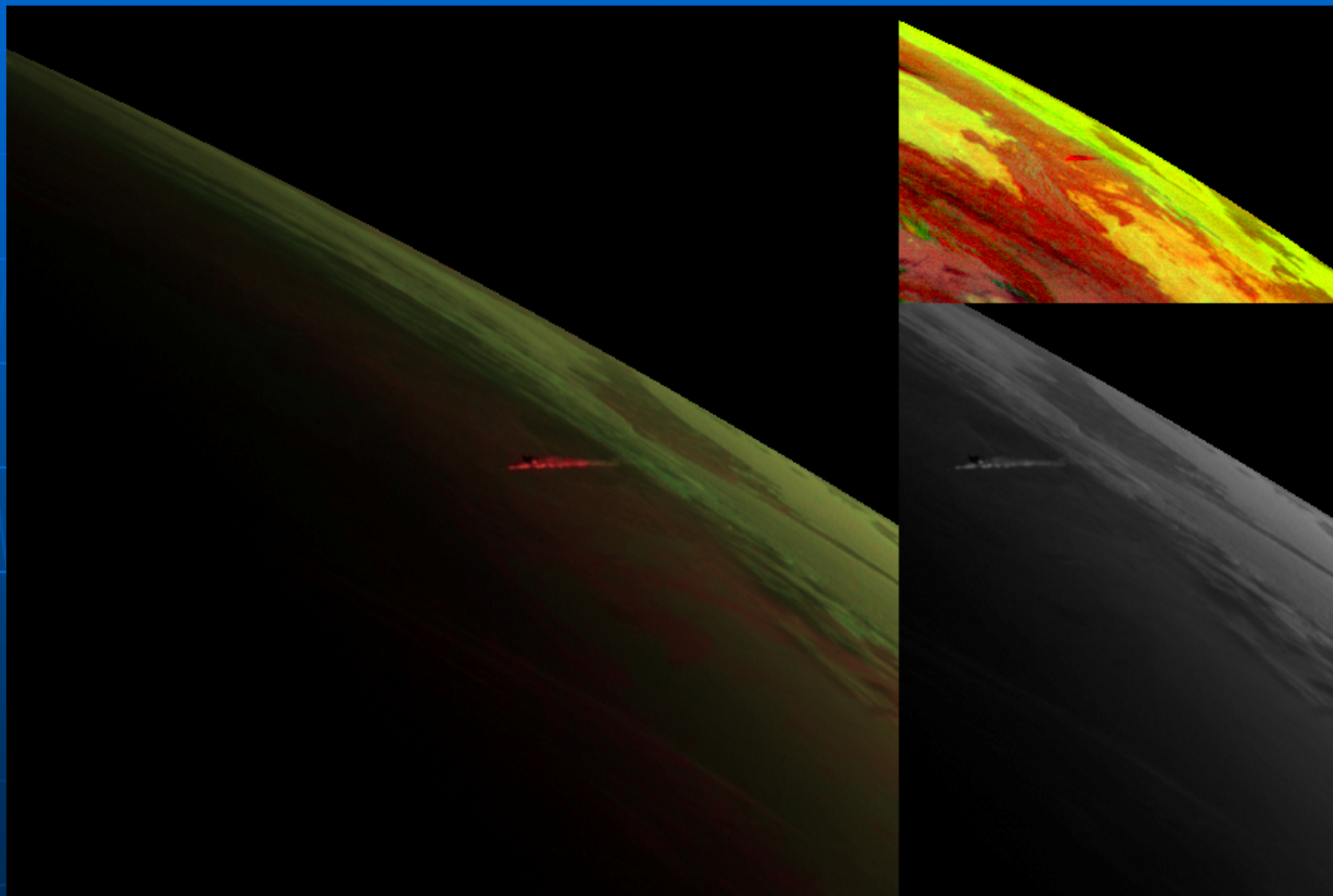
■ Na polární dráze

- DMSP (*USA*)
- Aqua, Terra (*Evropa*)
- Suomi NPP (*USA*)
- Fengyun 2D (*Čína*)



Satellite imagery of the meteor that made a fiery entry into the Earth's atmosphere over the Ural Mountains of Russia Friday was captured by scientists at the NOAA Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIIRA) at Colorado State University.
Credit: CIIRA/Naval Research Laboratory

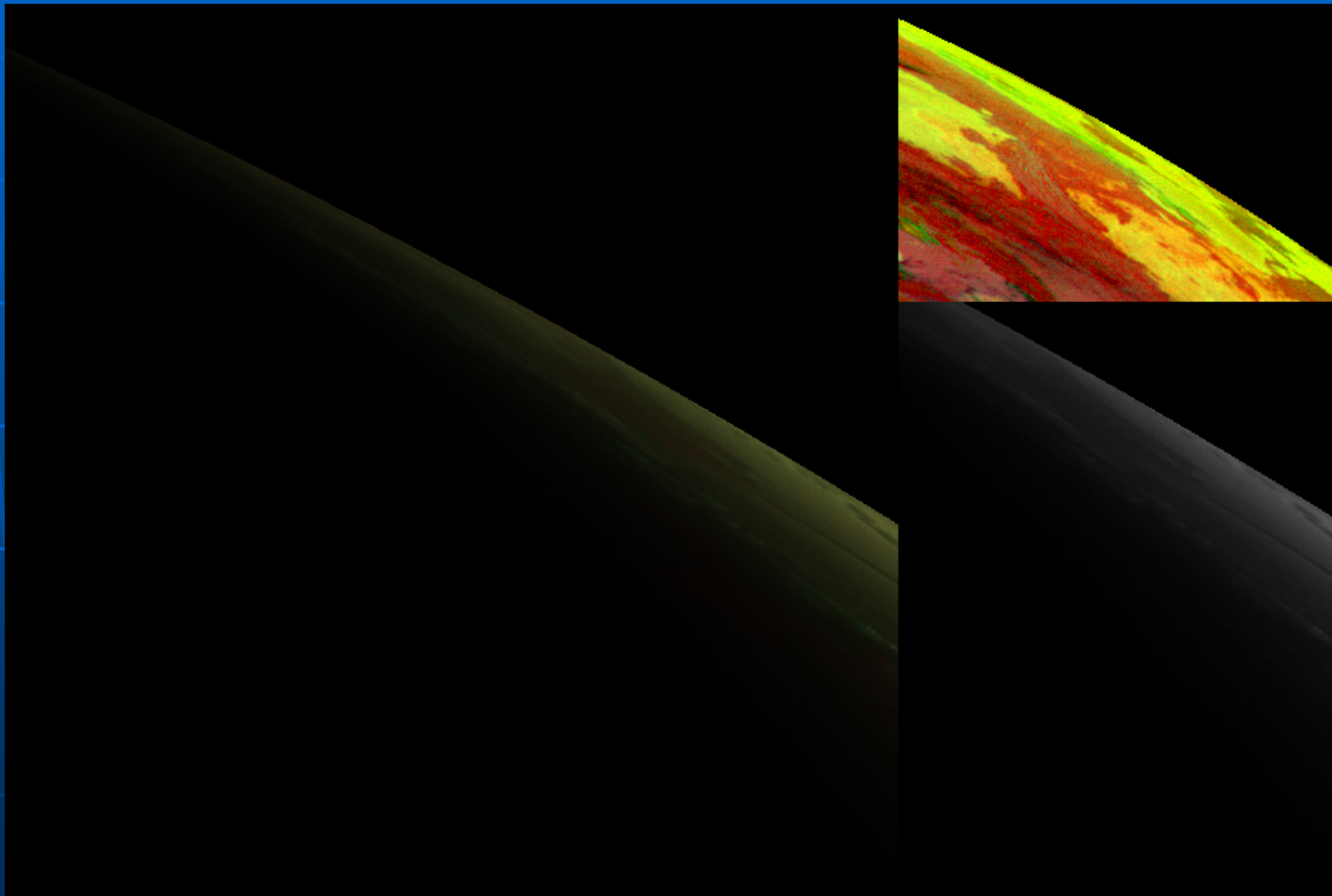
Družicové snímky stopy



Družice Meteosat (MSG2)

EUMETSAT a ČHMÚ (Zdeněk Charvát)

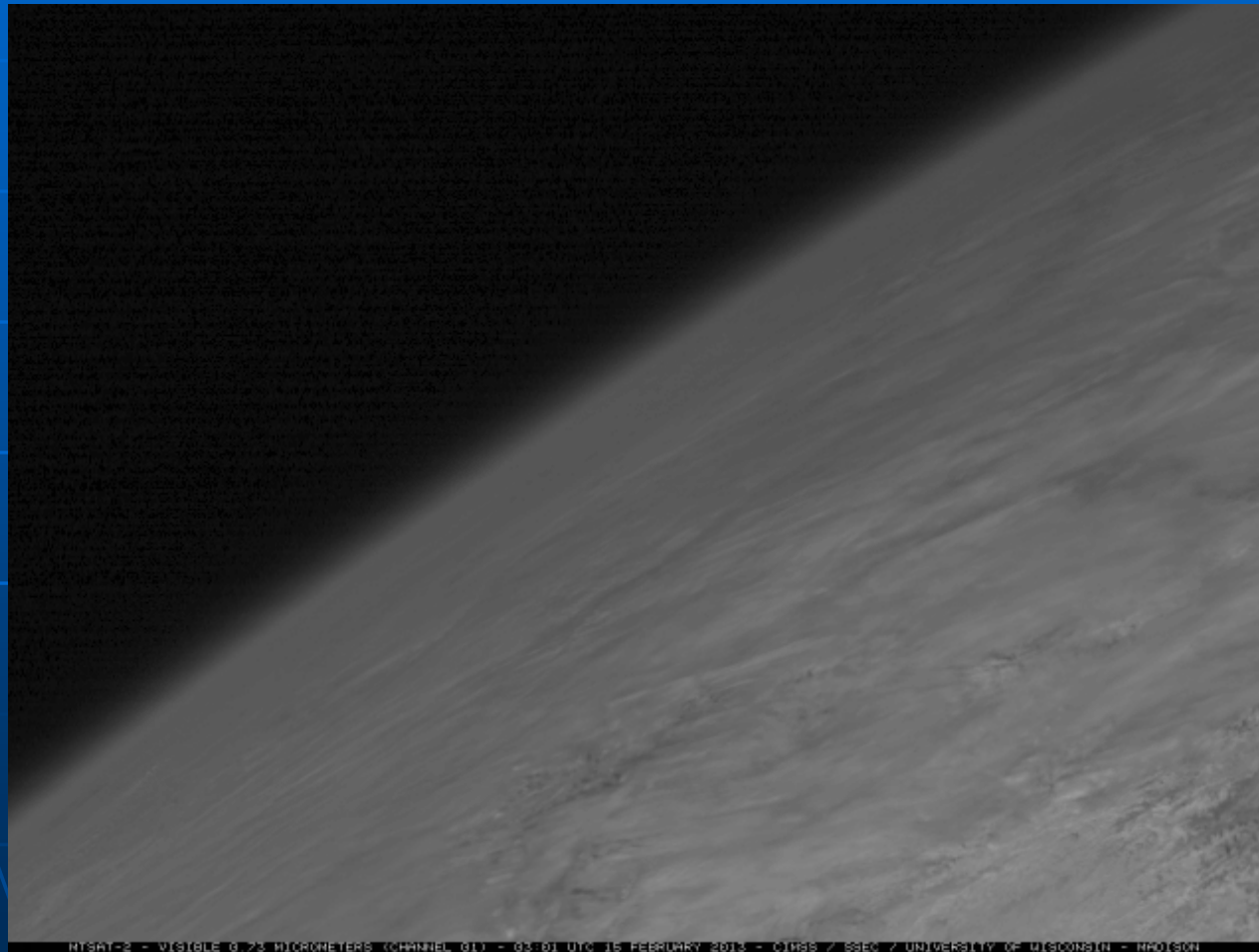
Družicová animace stopy



Družice Meteosat 9 (MSG2)

EUMETSAT a ČHMÚ (Zdeněk Charvát)

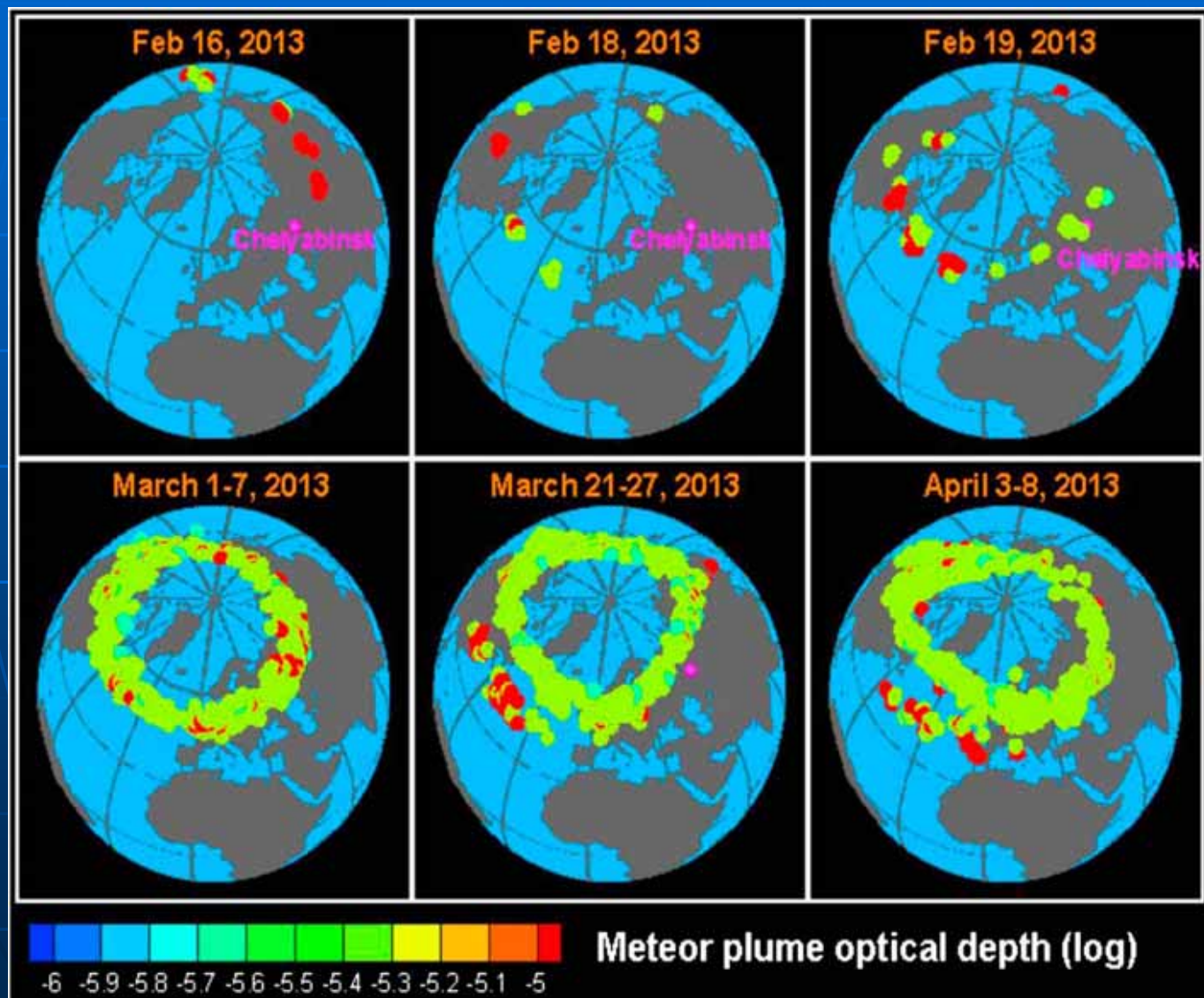
Družicová animace stopy



Družice MTSAT 2 (japonská)

University of Wisconsin-Madison

Prach obkroužil zeměkouli



Gorkavyi et al.
(2013)

Meteority vyhrabané ze sněhu



- V oblasti jižně od Čeljabinsku
- Tisíce převážně malých meteoritů
- Jeden velký (1,8 kg)

- Celkem > 100 kg
- Na jaře nalezeny další meteority, včetně 4 kg kusu

podívejte se na videoreportáž ...



Díra v ledu na jezeře Čebarkul



- 70 km západně od Čeljabinsku
- Průměr 8 m
- Dopad pozorován místním rybářem a z dálky zachycen kamerou

- Maličké úlomky meteoritu nalezeny v okolním ledu
- Velký kus (654 kg) vyloven z jezera 16. října



Vytažení z jezera



podívejte se na video ...

Meteorit v muzeu



Čeljabinské oblastní muzeum

Meteorit



po 8 měsících v bahně



foto David Částek

Typy meteoritů

- Kamenné (94% všech pádů)
 - chondrity (86%)
 - obyčejné (80%)
 - H (33%)
 - L (38%)
 - LL (9%) ←
 - uhlíkaté (4%)
 - enstatické (2%)
 - achondrity (8%)
- Železné (5%)
- Železokamenné (1%)



Čeljabinsk

Shrnutí – existující data

- Videa (~700)– obraz a zvuk
- Seismické záznamy
- Infrazvukové záznamy z celého světa
- Pozorování z umělých družic
 - vojenské satelity USA
 - meteorologické družice různých zemí
- Nalezené meteority
- Škody na budovách

Kalibrace pomocí hvězd

- Noční snímky fotil 25.2. až 7.3. pan David Částek, přímý svědek tlakové vlny bolidu – 12 míst
- Další snímky pořídil ruský tým vedený Olgou Popovou 17. a 24.3. – 3 místa

Kalibrační snímek





Nature, Nov 14, 2013

LETTER

doi:10.1038/nature12671

The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor

Jiří Borovička¹, Pavel Spurný¹, Peter Brown^{2,3}, Paul Wiegert^{2,3}, Pavel Kalenda⁴, David Clark^{2,3} & Lukáš Šrbený¹

LETTER

doi:10.1038/nature12741

A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors

P. G. Brown^{1,2}, J. D. Assink³, L. Astiz⁴, R. Blaauw⁵, M. B. Boslough⁶, J. Borovička⁷, N. Brachet³, D. Brown⁸, M. Campbell-Brown¹, L. Ceranna⁹, W. Cooke¹⁰, C. de Groot-Hedlin⁴, D. P. Drob¹¹, W. Edwards¹², L. G. Evers^{13,14}, M. Garces¹⁵, J. Gill¹, M. Hedlin⁴, A. Kingery¹⁶, G. Laske⁴, A. Le Pichon³, P. Mialle⁸, D. E. Moser⁵, A. Saffer¹⁰, E. Silber¹, P. Smets^{13,14}, R. E. Spalding⁶, P. Spurný⁷, E. Tagliaferri¹⁷, D. Uren¹, R. J. Weryk¹, R. Whitaker¹⁸ & Z. Krzeminski¹

Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization

Olga P. Popova,¹ Peter Jenniskens,^{2,3*} Vacheslav Emel'yanenko,⁴ Anna Kartashova,⁴ Eugeny Biryukov,⁵ Sergey Khaibrakhmanov,⁶ Valery Shuvalov,¹ Yuriy Rybnov,¹ Alexandr Dudorov,⁶ Victor I. Grokhovsky,⁷ Dmitry D. Badyukov,⁸ Qing-Zhu Yin,⁹ Peter S. Gural,² Jim Albers,² Mikael Granvik,¹⁰ Láslo G. Evers,^{11,12} Jacob Kuiper,¹¹ Vladimir Kharlamov,¹ Andrey Solov'yov,¹³ Yuri S. Rusakov,¹⁴ Stanislav Korotkiy,¹⁵ Ilya Serdyuk,¹⁶ Alexander V. Korochantsev,⁸ Michail Yu. Larionov,⁷ Dmitry Glazachev,¹ Alexander E. Mayer,⁶ Galen Gisler,¹⁷ Sergei V. Gladkovsky,¹⁸ Josh Wimpenny,⁹ Matthew E. Sanborn,⁹ Akane Yamakawa,⁹ Kenneth L. Verosub,⁹ Douglas J. Rowland,¹⁹ Sarah Roeske,⁹ Nicholas W. Botto,⁹ Jon M. Friedrich,^{20,21} Michael E. Zolensky,²² Loan Le,^{23,22} Daniel Ross,^{23,22} Karen Ziegler,²⁴ Tomoki Nakamura,²⁵ Insu Ahn,²⁵ Jong Ik Lee,²⁶ Qin Zhou,^{27,28} Xian-Hua Li,²⁸ Qiu-Li Li,²⁸ Yu Liu,²⁸ Guo-Qiang Tang,²⁸ Takahiro Hiroi,²⁹ Derek Sears,³ Ilya A. Weinstein,⁷ Alexander S. Vokhmintsev,⁷ Alexei V. Ishchenko,⁷ Phillipe Schmitt-Kopplin,^{30,31} Norbert Hertkorn,³⁰ Keisuke Nagao,³² Makiko K. Haba,³² Mutsumi Komatsu,³³ Takachi Mikouchi³⁴ (the Chelyabinsk Airburst Consortium)

Science, Nov 29, 2013

Parametry dráhy v atmosféře

Délka světelné dráhy: 272 km

Pozorovaný rozsah výšek: 95.1 – 12.6 km

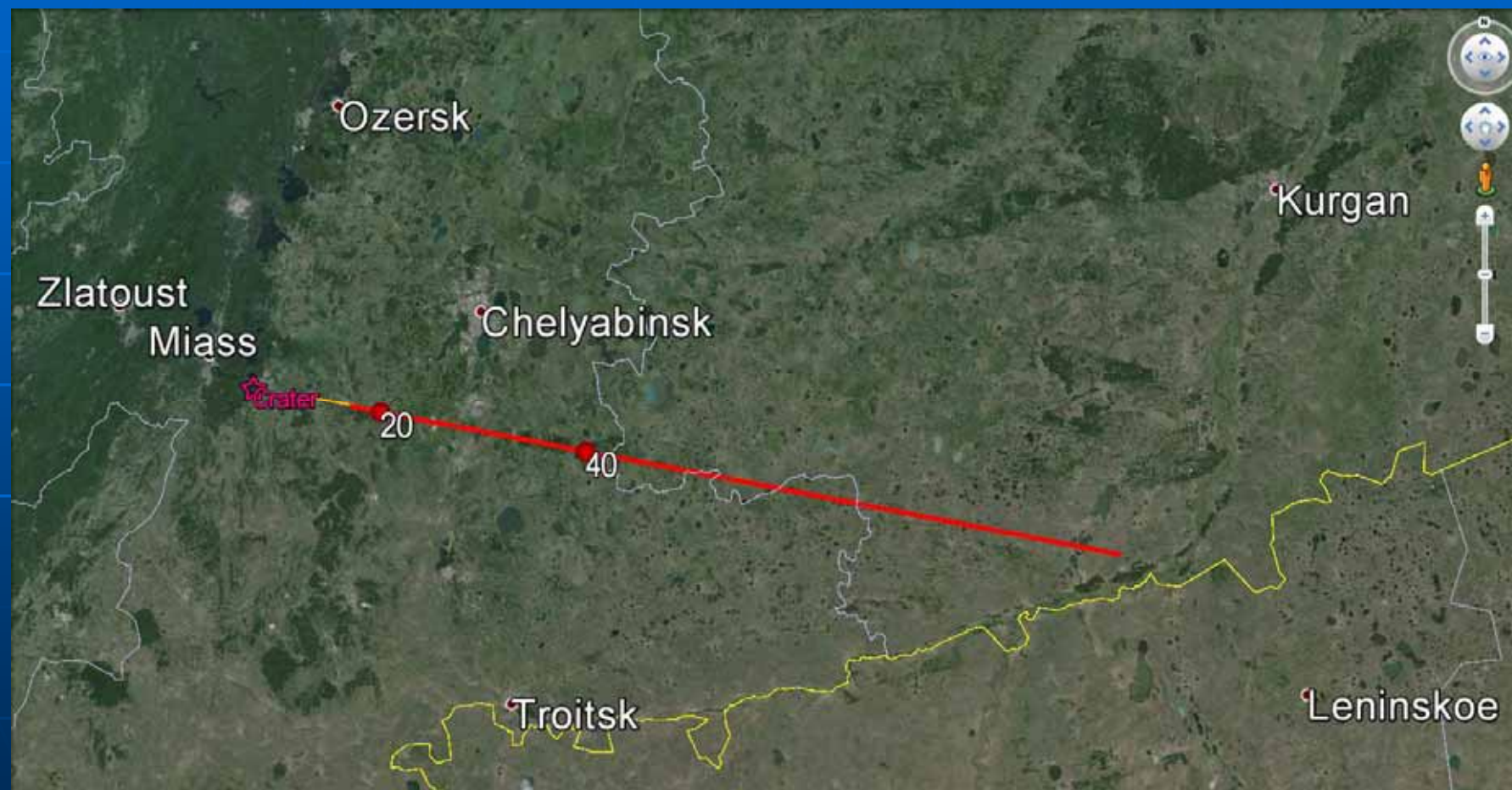
Sklon: 18.5° na začátku
17° na konci

Počáteční rychlost: 19.03 ± 0.13 km/s

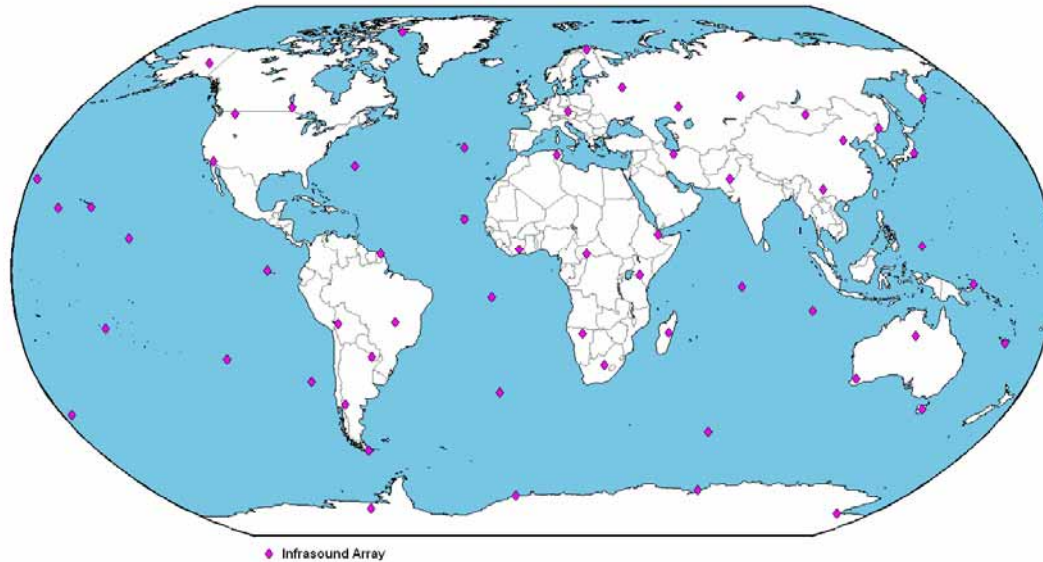
Koncová rychlost: 3.2 km/s

Trvání bolidu: 16 seconds

Dráha bolidu



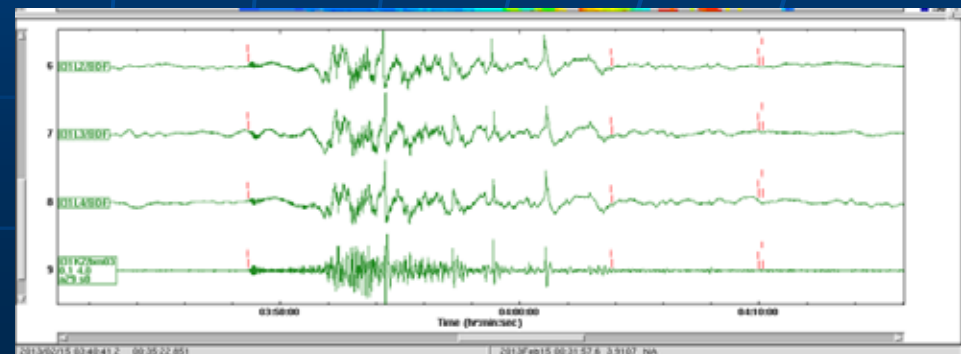
INTERNATIONAL MONITORING SYSTEM
INFRA-SOUND NETWORK



Infrazvuk - určení energie bolidu

- Bolid Čeljabinsk detekovalo 20 stanic
- Na Aljašce trojnásobná detekce tři dny po sobě
- Perioda infrazvukových vln závisí na energii výbuchu (bolidu)

záznam stanice I31 Kazachstán



Energie a velikost

- Energie určená z infrazvukových, seismických a družicových dat:
500 (± 100) kt TNT
- Počáteční hmotnost planetky určená ze známé energie a rychlosti:
12 tisíc tun
- Původní velikost, předpokládáme-li stejnou hustotu, jako mají meteority (3300 kg/m^3):
19 metrů (17 – 20 m)

Atmosférické výbuchy

Bolid	Energie kt TNT*
Tunguzka (1908)	10 000
Čeljabinsk (2013)	500
Indonésie (2009)	50
Maršalovy ostrovy (1994)	20
Sichote Alin (1947)	10
2008 TC ₃ (Súdán)	1
Morávka (2000)	0,1

Největší jaderný výbuch (SSSR 1961)	50 000
Sopečný výbuch Hory Sv. Heleny (USA 1980)	20 000
Největší jaderný výbuch USA (1954)	15 000
Hirošimská bomba (1945)	15
Největší konvenční výbuch (USA 1985)	4

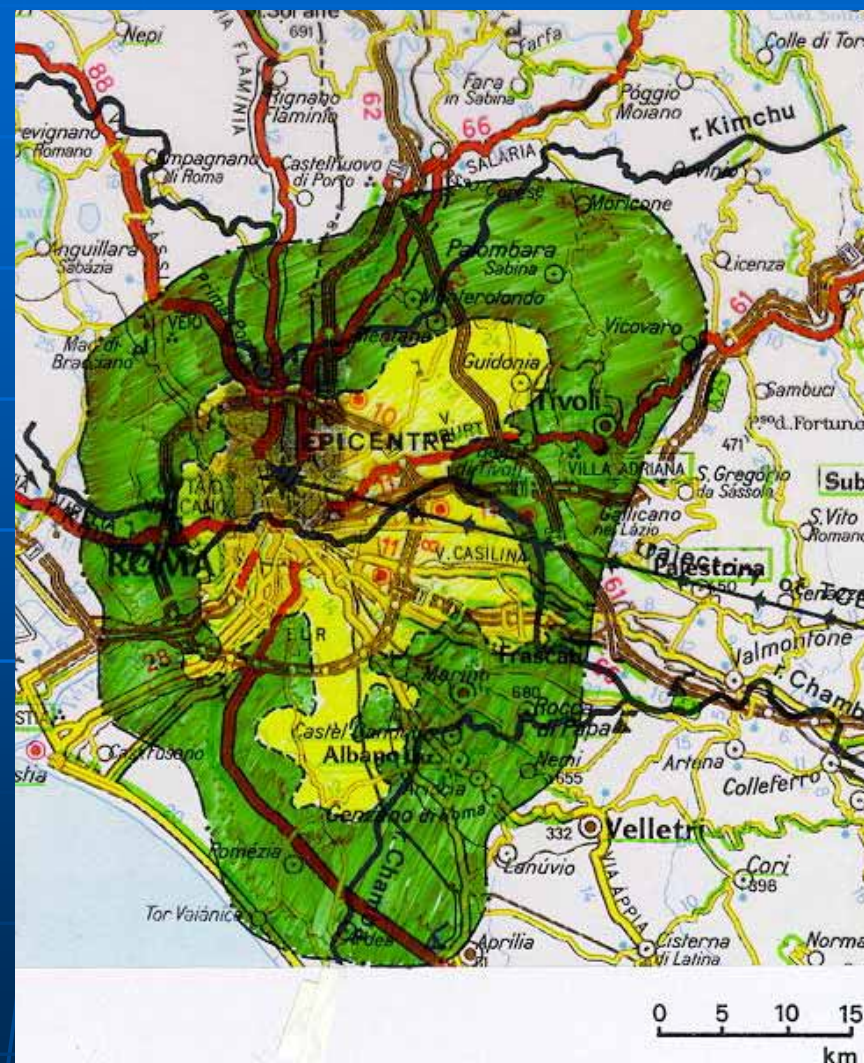
* 1 kt TNT = $4,185 \times 10^{12}$ J

Tunguzka (30. 6. 1908)



Kulikova expedice, 1928

Oblast zničená tlakovou vlnou
60 x 40 km



porovnání s Římem

Sichote Alin (12. 2. 1947)



~23 tun železných meteoritů
největší kus 1700 kg
největší kráter Ø 27 m



Kráter Carancas (Peru)



15. 9. 2007

Ø 14 m

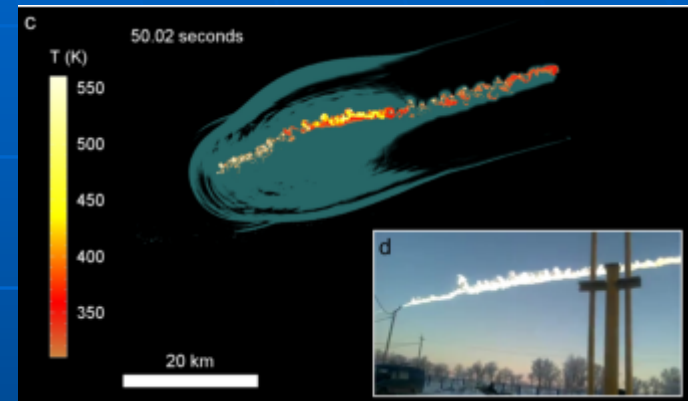
hloubka 3 m

obyčejný
chondrit

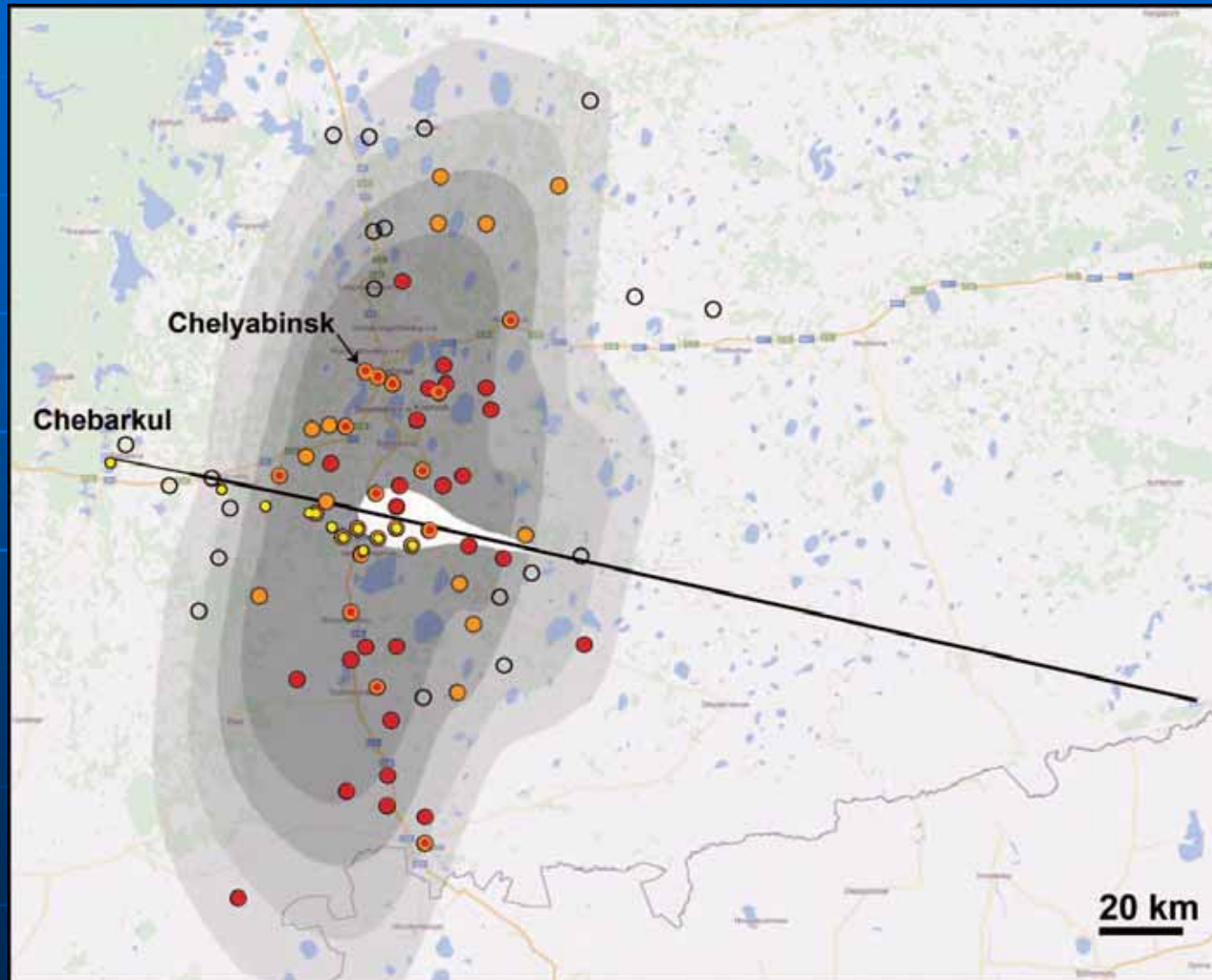
původní rozměr
0.9 – 1.7 m

Rázová vlna – válcová nebo sférická?

- Rázová vlna, která způsobila škody, byla válcová
- Modelování ukázalo, že vlna přišla na různá místa z různých výšek podél dráhy
- Slabší vlny, které přišly později, byly sférické z jednotlivých bodů rozpadu



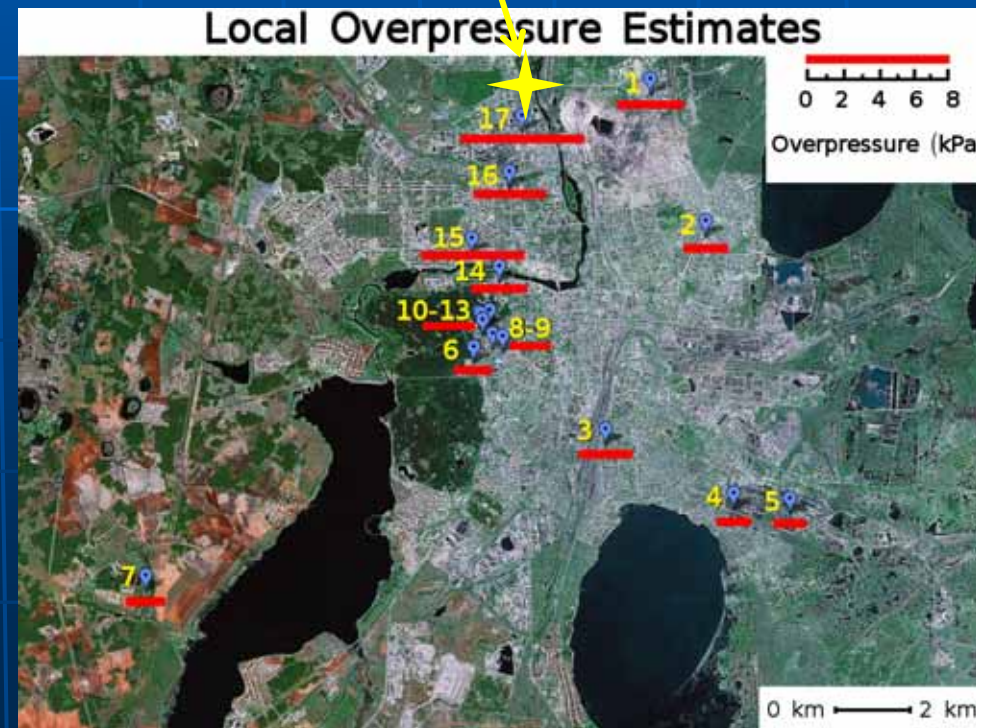
Mapa rozbitých oken a modelu přetlaku



Okna rozbita
u 7230
budov

Škody v Čeljabinsku

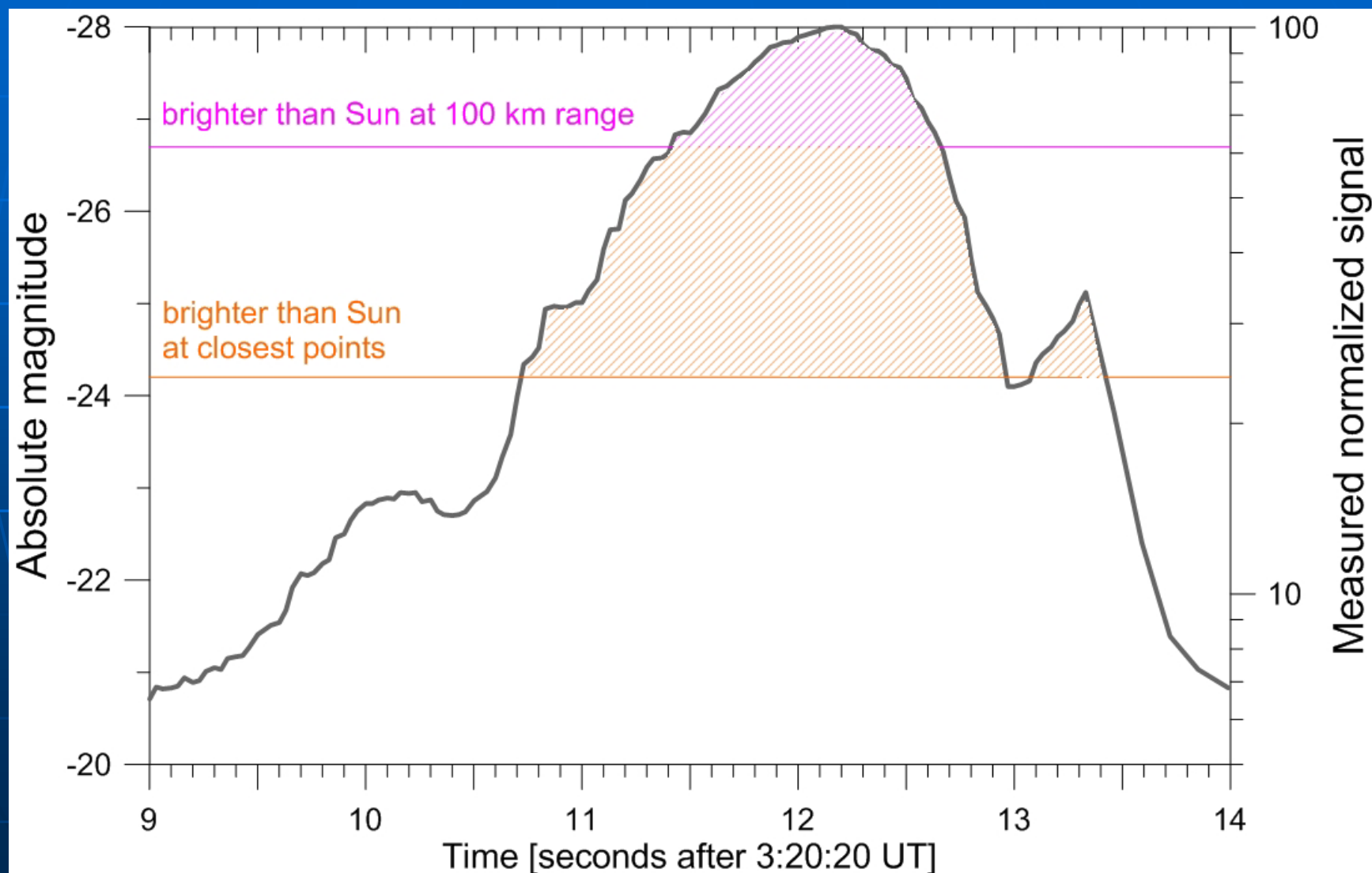
- Z 5000 prozkoumaných oken asi 10% prasklo
- Bylo poznamenáno 40% budov
- Rychlost tříštěného skla 7 – 9 m/s
- Přetlak ve vlně byl několik procent atmosférického tlaku
- Střecha budovy se zřítila v oblasti fokusace?



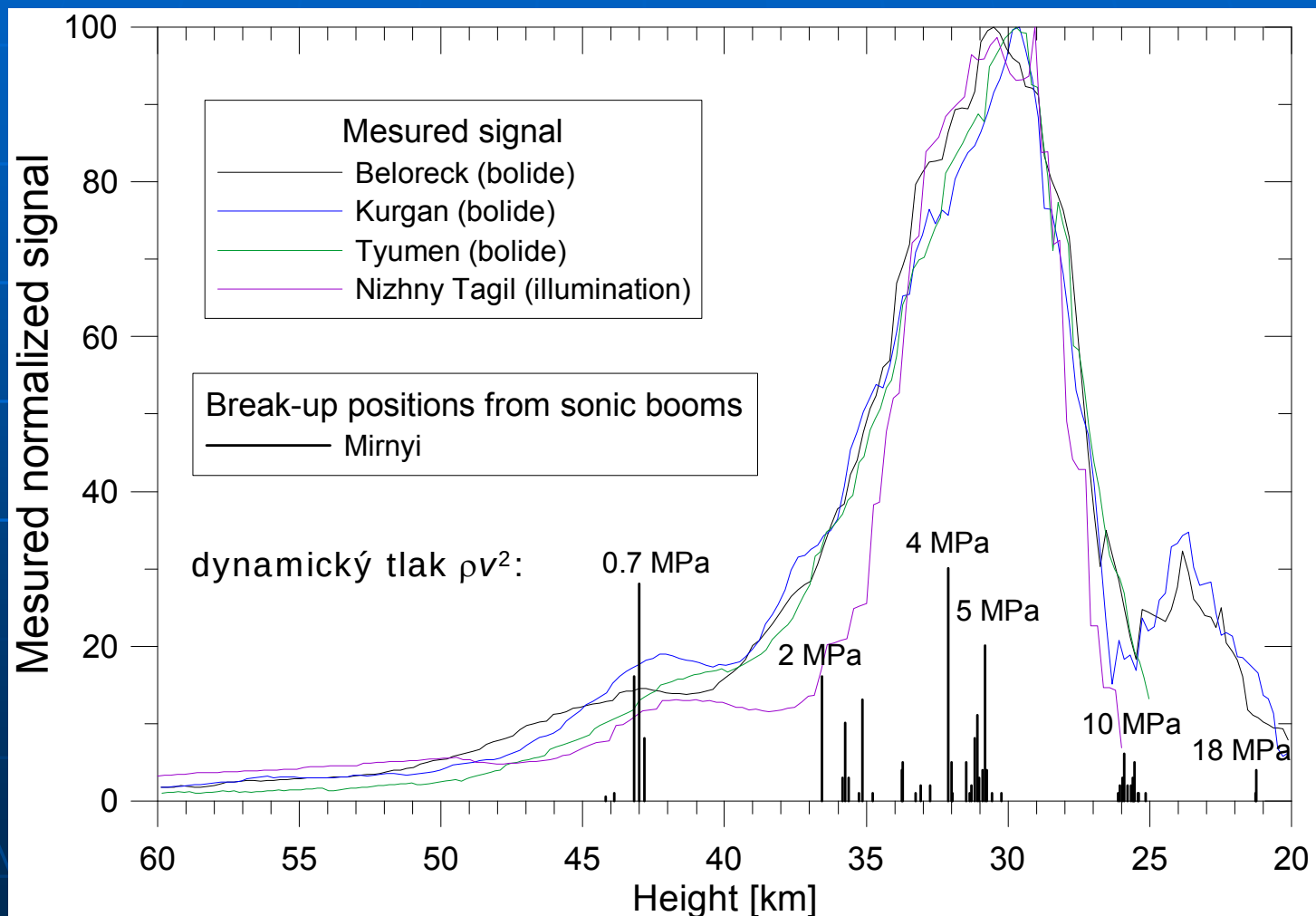
Zranění

- 1 613 lidí požádalo o ošetření v nemocnicích, 112 lidí bylo hospitalizováno, 2 ve vážném stavu; nikdo nezemřel
- Zranění byla většinou od rozbitého skla
- Další hlášené újmy: horko, popáleniny, bolesti očí, přechodné ohluchnutí, stres
- Žádné větší škody ani zranění nebyly od padajících meteoritů

Světelná křivka (nejjasnější část)



Výšky rozpadů



Průběh rozpadů

- První rozpad ve výšce ~ 45 km, pod tlakem ~ 0.5 MPa (ztraceno 1% hmoty)
- Totální rozpad (95% hmoty ztraceno) ve výškách 39–30 km, tlak 1 – 5 MPa
- Ve výšce 29 km zbývalo 10 – 20 balvanů o rozměrech 1–3 m
- Tyto balvany se dále rozpadaly ve výškách 26–22 km pod tlakem ~ 10 –18 MPa

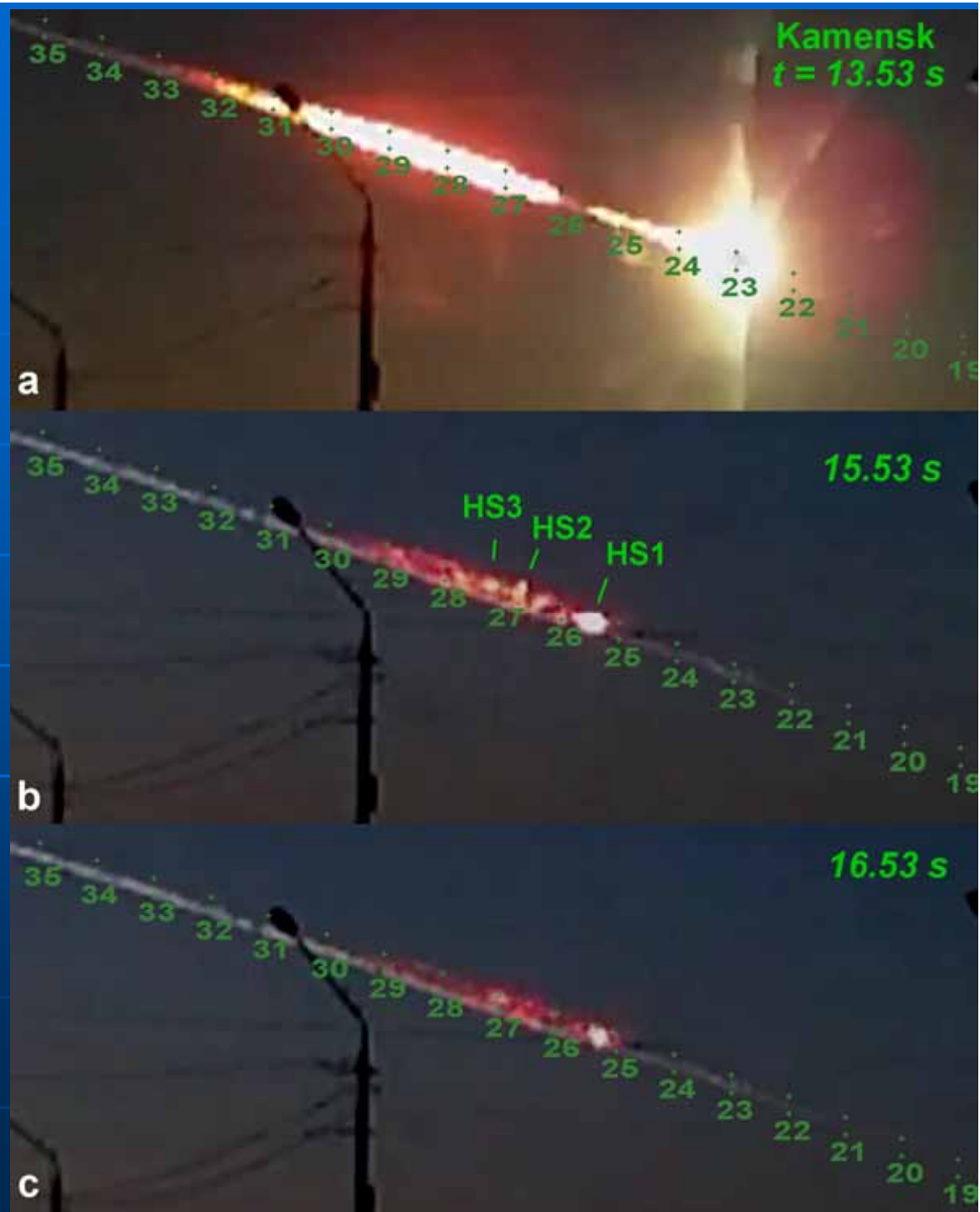
Normální pevnost v tlaku u meteoritů je ~ 50 MPa
Pevnost tělesa byla snížena prasklinami

Přímo viditelné úlomky

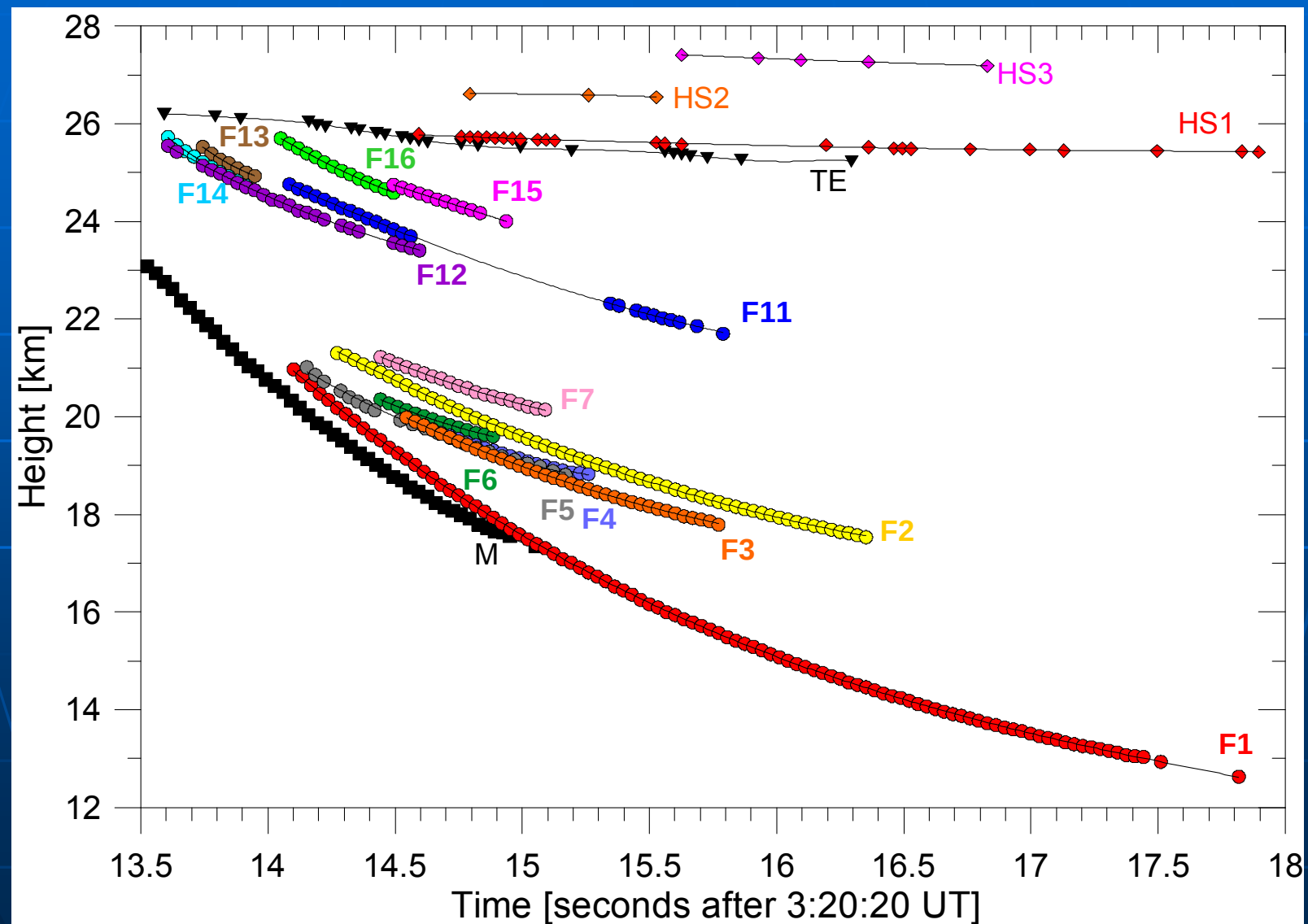


Pohyby v čerstvé stopě

- Čelo stopy
- Horké skvrny



Měřený pohyb úlomků



Vlastnosti úlomků

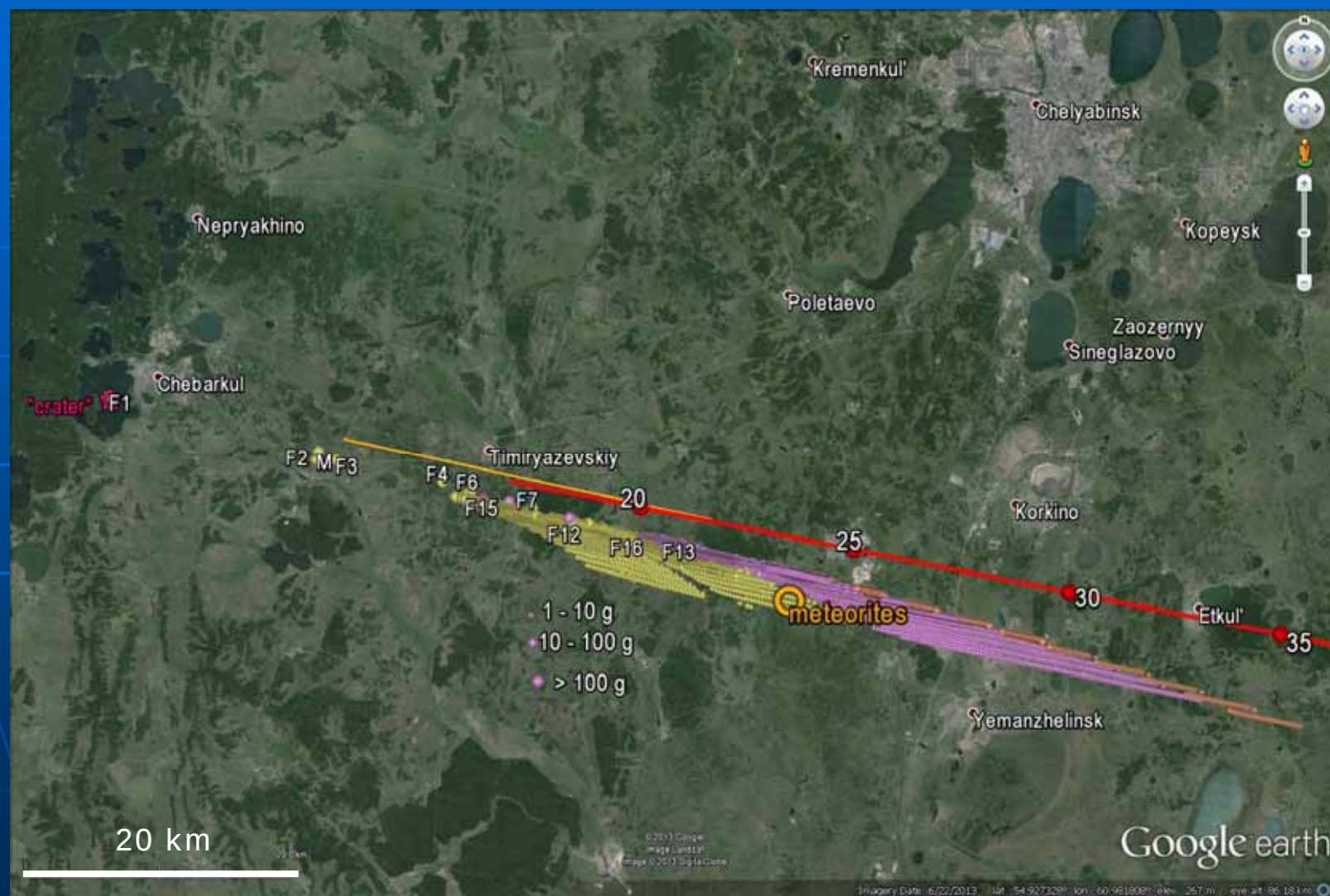
Spodní úlomky

Úlomek	Koncová hmotnost, kg	Boční rychlost, km/s
M	15	-----
F1	420 ± 50	0.4 ± 0.13
F2	30	~ 0.3
F3	15	~ 0.3
F4	3	
F5	1	
F6	2	
F7	0.5	

Horní úlomky

Úlomek	Koncová hmotnost, kg
F11	5
F12	1.5
F13	0.2
F14	0.5
F15	5
F16	0.3

Výpočet míst dopadu meteoritů



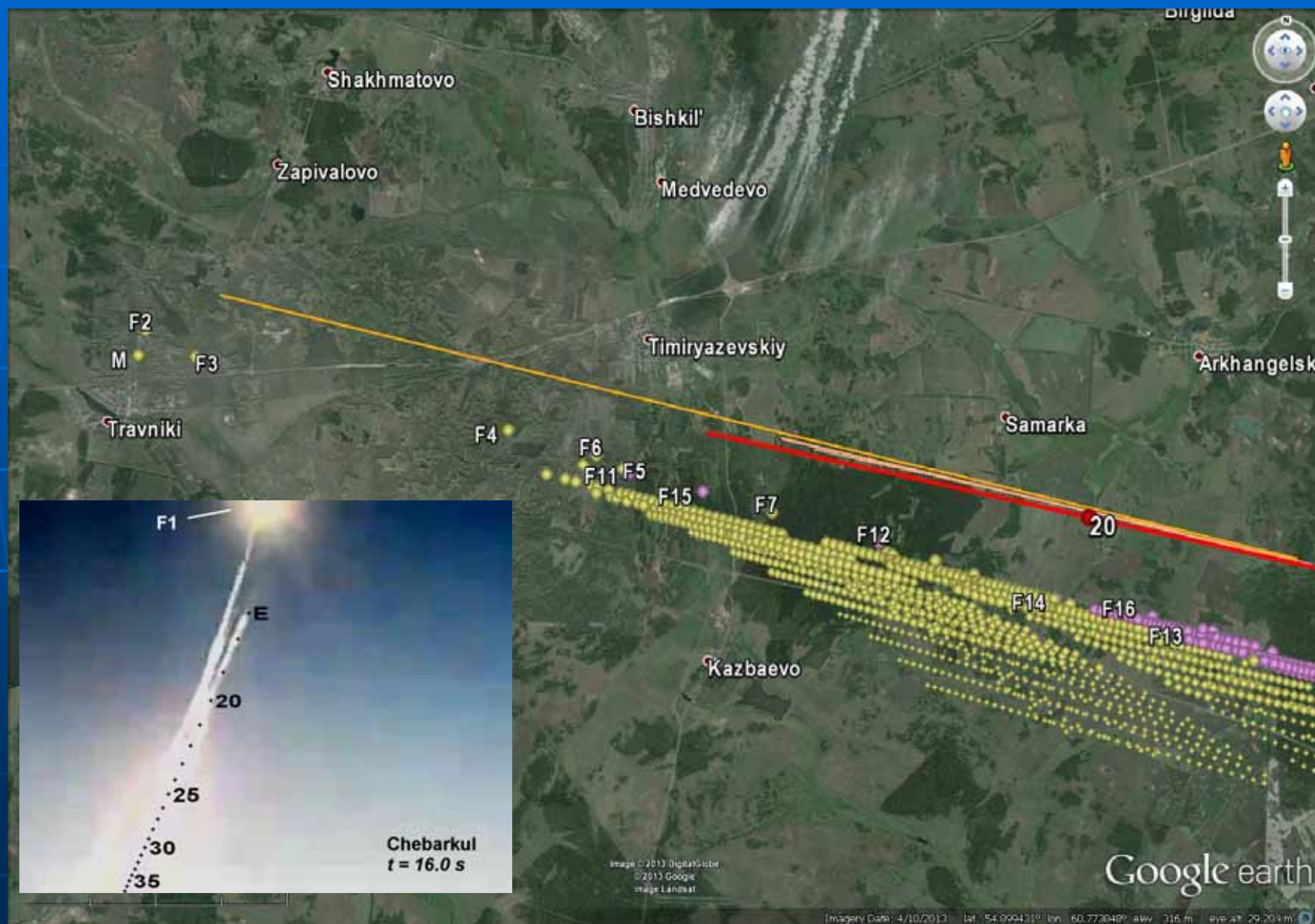
použit vítr z Vrchního Dubrova

Detail – jezero Čebarkul



vítr: F1 – V. Dubrovo, K – Kurgan, U – UKMO model, G – G2S model

Detail – konec dráhy



použit vítr z Vrchního Dubrova

Nález úlomku F3 (1.12. 2013)

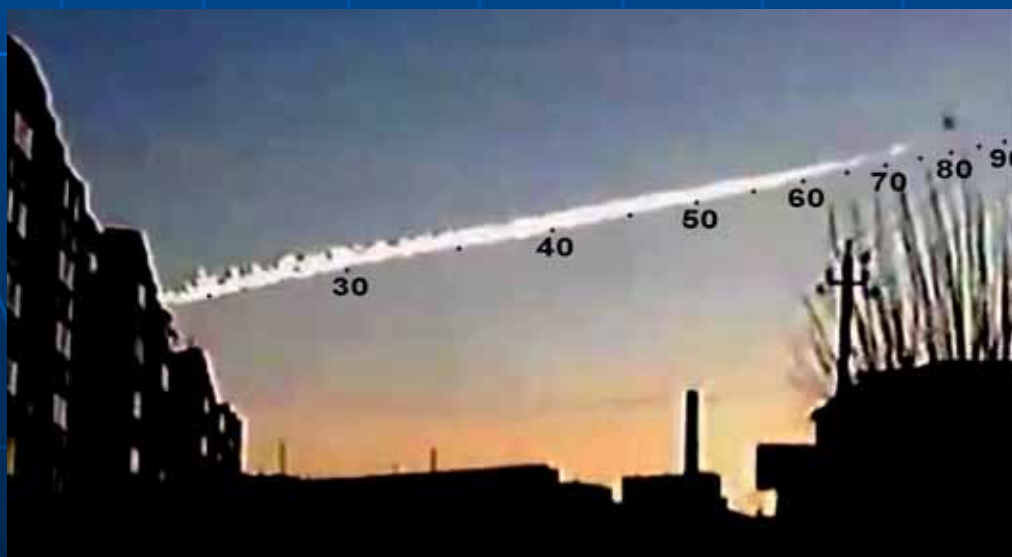
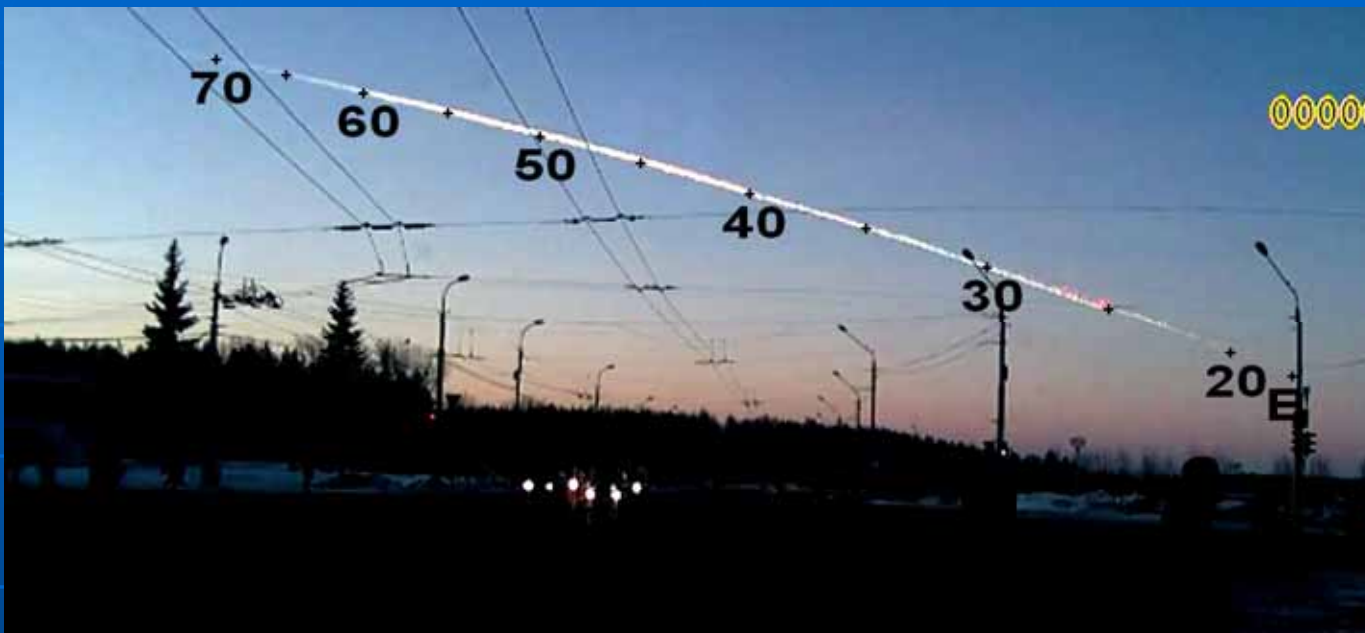


Úlomek F3



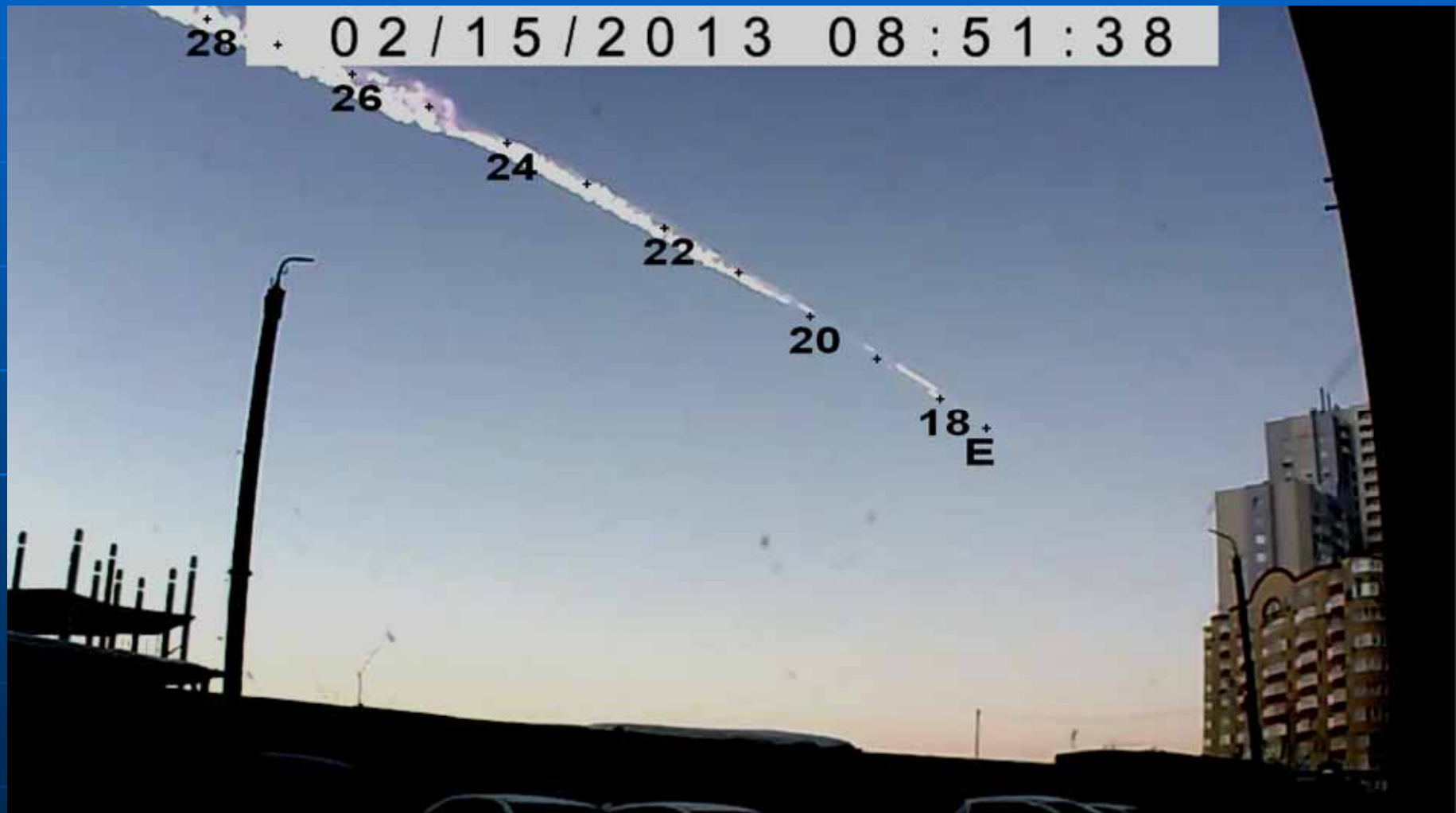
- 24,3 kg
- 240 metrů od předpovězeného místa

Prach v atmosféře

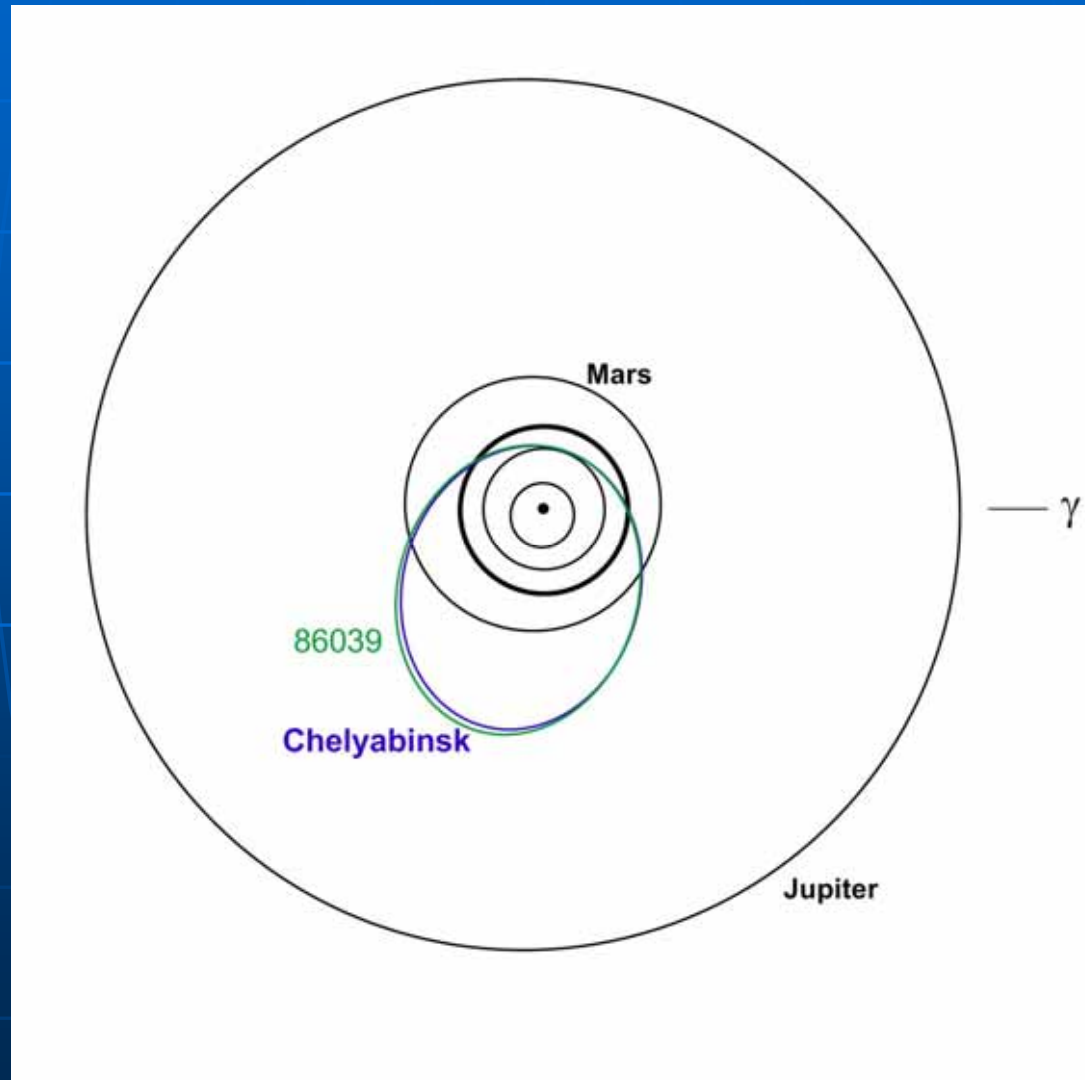


- ve výškách 70–18 km
- mezi 60–25 km počáteční průměr stopy 2–3 km

Spodní část prachové stopy

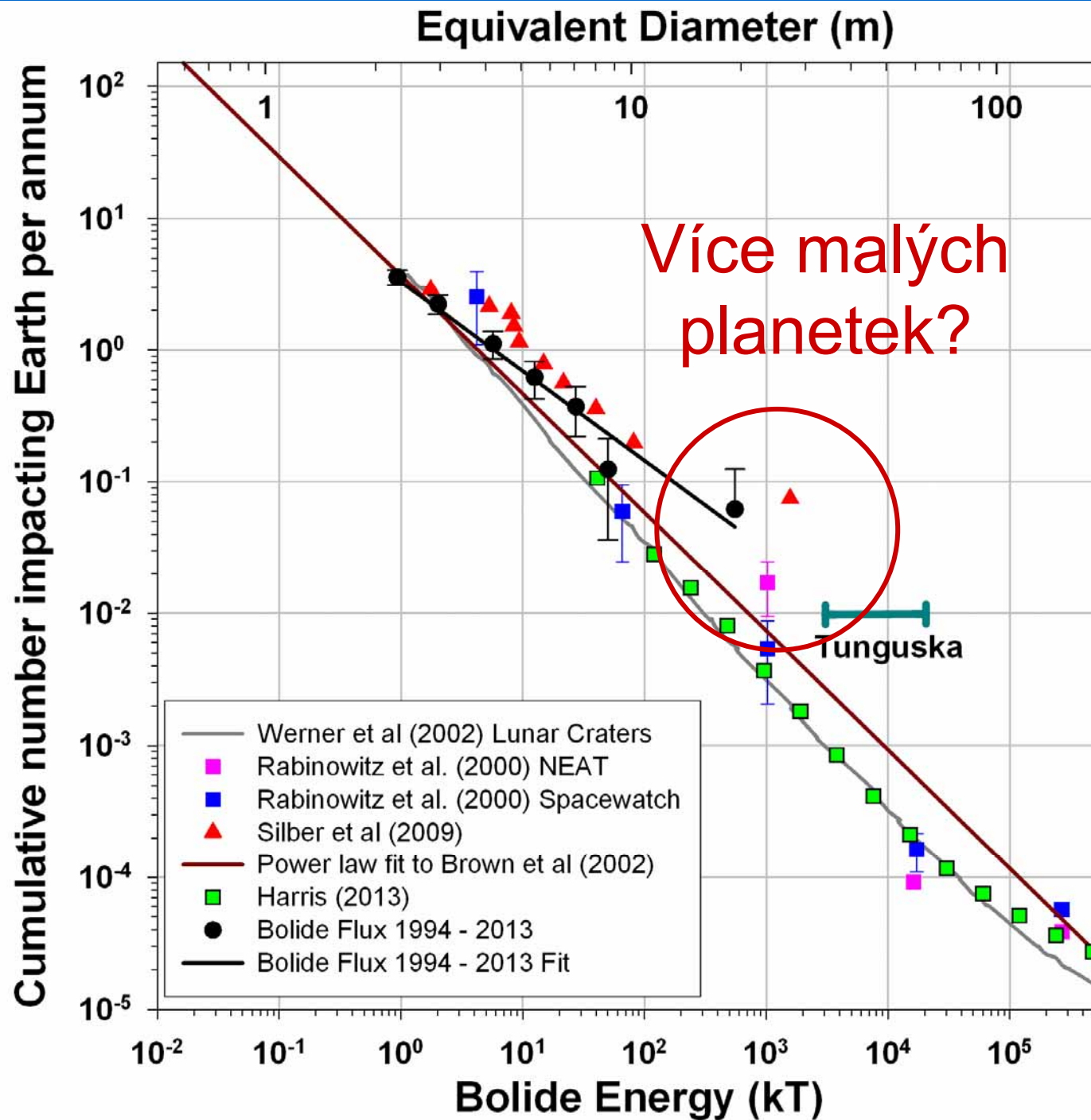


Porovnání dráhy ve Sluneční soustavě s 2-km planetkou 86039 (1999 NC43)



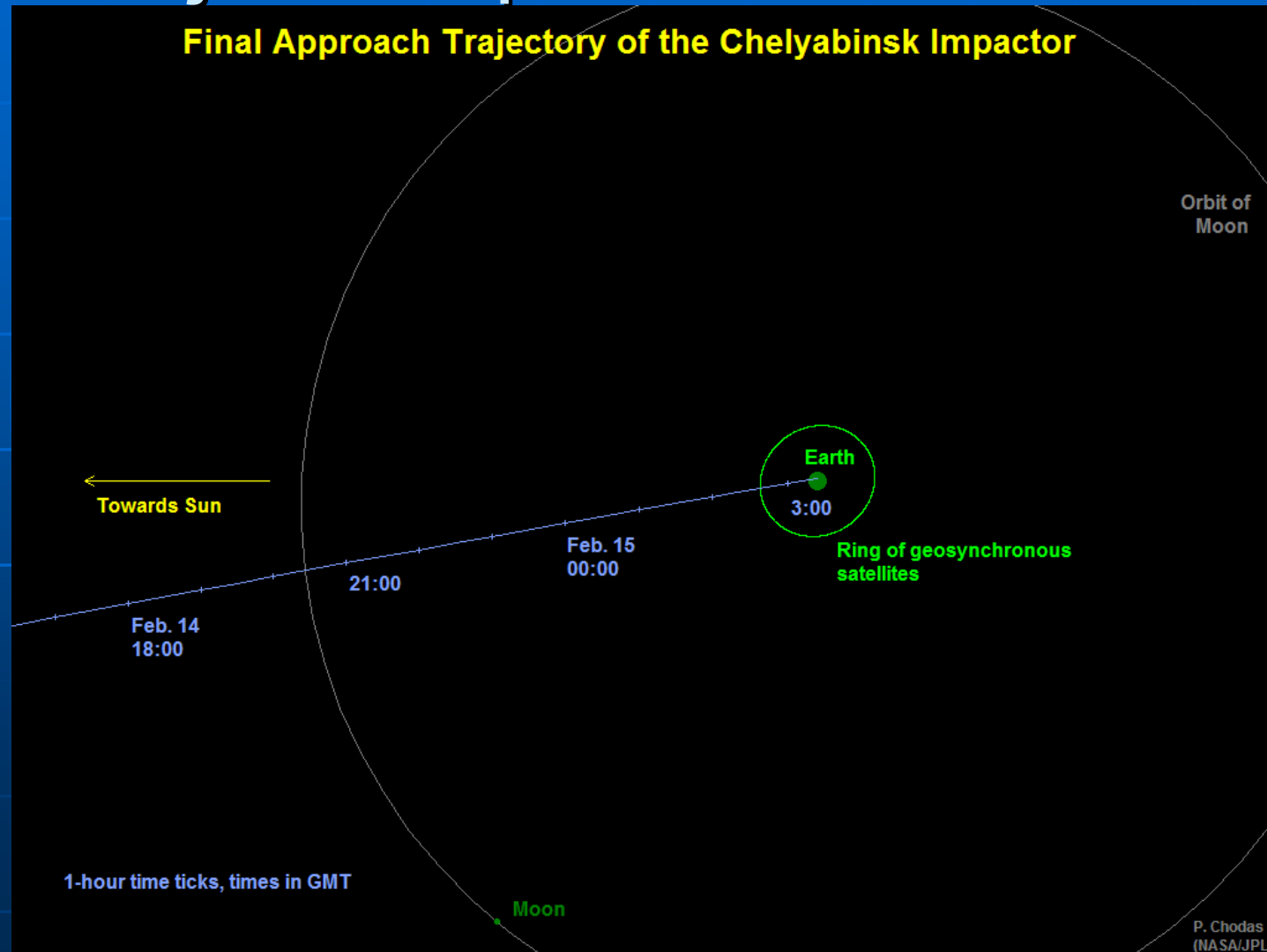
Hypotéza

- Planetka 86039 se nedávno (před < 100 tis. lety) srazila s jinou planetkou a při této srážce byla z jejího povrchu vyvržena čeljabinská planetka
- Podobné srážky mohou být důvodem proč v okolí Země existuje více planetek o rozměrech 10-50 m než by odpovídalo dlouhodobé rovnováze



Brown
et al.

Proč nebyla čeljabinská planetka objevena před srážkou se Zemí?



Přiletěla
ve směru
od Slunce

Ale i jinak by
byla šance
objevu malá

Shrnutí

- Čeljabinská událost byla první katastrofa způsobená kosmickým tělesem
- Planetky o rozměrech ~20 metrů jsou nebezpečné
- Poměrně křehké těleso, rozpadalo se ve výškách nad 30 km; jen malá část původní hmoty dopadla jako meteority
- Škody pouze od tlakové vlny. Pokud by těleso proniklo níže, vlna by byla silnější
- Největší potenciální hrozba – záměna s vojenským útokem
- Planetek této velikosti může být více než se myslelo

Jak se bránit malým planetkám?

- Objevit je několik dní až týdnů před dopadem
- Vypočítat místo dopadu. Pokud jde o obydlenou oblast, varovat, příp. evakuovat obyvatelstvo
- Projekt ATLAS (Asteroid Terrestrial-Impact Last Alert System) – Univ. of Hawaii – malé dalekohledy, levné
- Nicméně ze země je dostupných jen 60% oblohy. Pro úplné pokrytí je třeba pozorování z družic