

Spadek meteorytu Moravka

J. Borovicka^{1*}, H.W. Weber², T.J. Jopek³, P. Jakes⁴, Z. Randa⁵, P.G. Brown⁶, D. O. ReVelle⁷, Kalenda⁸, L. Schultz², J. Kucera⁵, J. Haloda⁴, P. Tycova⁴, J. Fryda⁹ and F. Brandstatter¹⁰

¹ Astronomical Institute, Academy of Sciences, Ondrejov, CZ
² Max-Planck-Institut für Chemie, Joh. J.-Becher-Weg 27, Mainz, D
³ Astronomical Observatory of A.Mickiewicz University, Poznań, PL
⁴ Inst. of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Sciences, Rez near Prague, CZ
⁵ Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences, Rez near Prague, CZ
⁶ Dep. of Physics and Astronomy, University of Western Ontario, London, CA
⁷ Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA
⁸ CoalExp, Kosmonautu 2, 70030 Ostrava 3, CZ
⁹ Czech Geological Survey, Prague, CZ
¹⁰ Dep. Of Mineralogy and Petrography, Museum of National History, Viena, A

Borovicka et al. 2003, *Meteoritics & Planetary Science* 38, 1005

Zagadnienia:

- Obserwowane spadki meteorytów
- Bolid Moravka:
 - Dane obserwacyjne
 - Trajektoria bolidu, orbita
 - Energia, jasność bolidu, masa początkowa
 - Skład chemiczny, struktura
 - Historia meteoroidu
- Podsumowanie

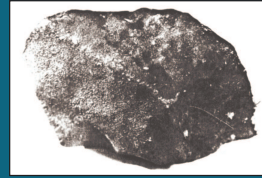
Spadki meteorytów. Bolidy obserwowane z kilku stacji.



Pribram 1959.04.07, 19:30 UT



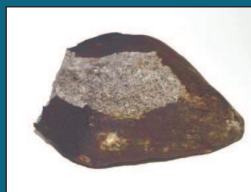
Lost City 1970.01.03, 20:14 UT



Inisfree 1977.02.06, 02:17 UT



Peekskill 1992.10.9, 23:48 UT

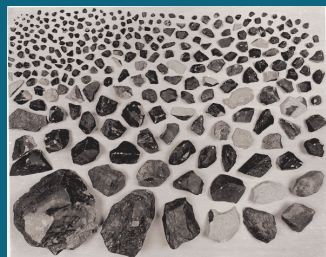


Moravka 2000.5.06, 11:52



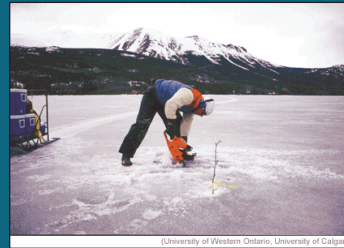
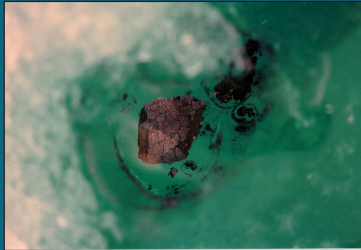
Neuschwanstein 2002.04.6, 22:20 LT

Spadki meteorytów: obserwacje wizualne, satelitarne

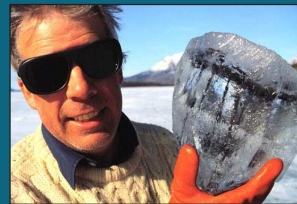


Glanerburg 1990.04.18:32:38 UTC

Spadki meteorytów: obserwacje wizualne, satelitarne



Tagish Lake 2000.01.18, 8 UT



Znaczenie precyzyjnych danych o bolidach

- położenie, prędkość → orbita → dynamiczna historia, pochodzenie
- trajektoria atmosferyczna, gęstość, rozmiary, kształt → kalibrowanie danych bolidowych.

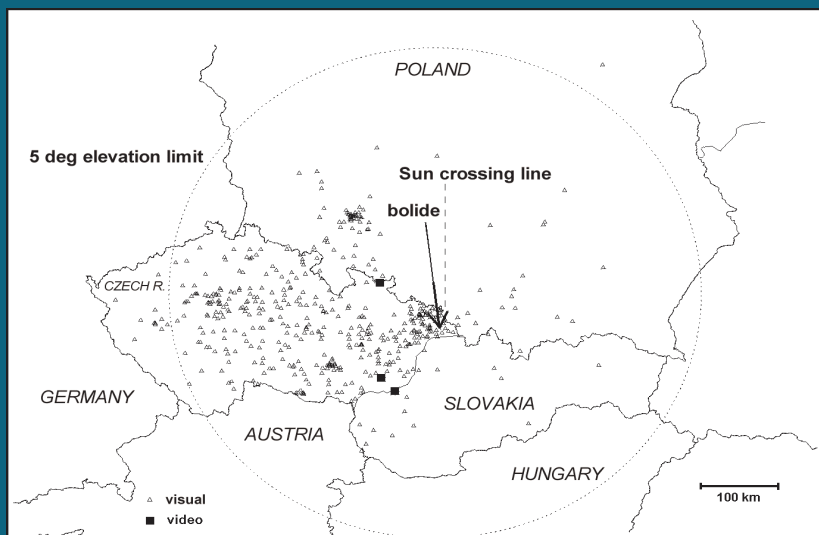
Np. Ceplecha i McCrosky (1976) masa wykorzystali obserwacje meteorytu Lost City kiedy opracowali metodę klasyfikacji meteoroidów opartą o obserwowane wysokości.

Meteority Innisfree i Lost City wykorzystano przy wyprowadzeniu formuły na wydajność świetlną bolidów (Halliday et al. 1981, Ceplecha 1996).

Bolid Moravka, dane obserwacyjne

- relacje świadków,
- rejestracje wideo,
- dane sejsmiczne,
- sygnały infradźwiękowe (0.01-20 Hz)
- **rejestracje satelitarne:** czujniki w paśmie wizualnym i podczerwieni, (system satelitarny DoD)

Bolid Moravka: Maj, 6, 2000, 13:52 LT



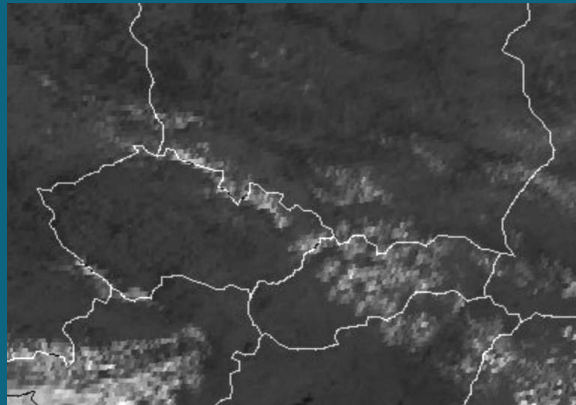
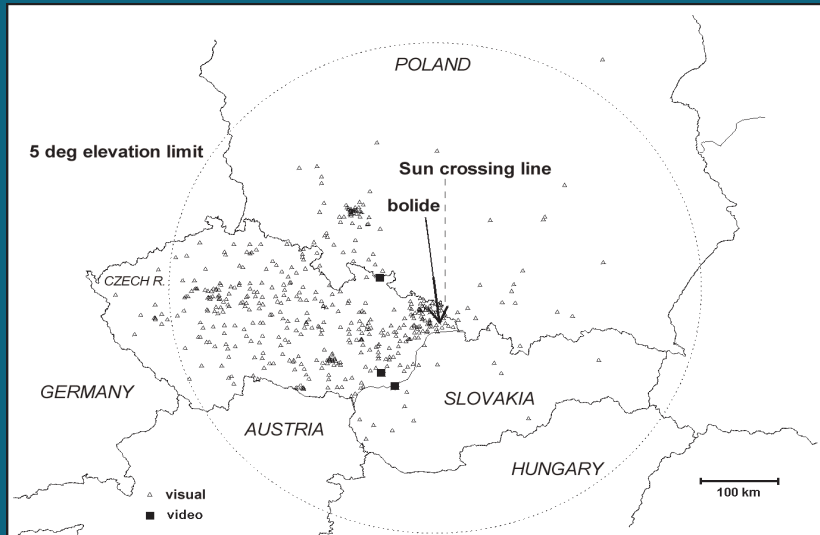


FIG. 2. METEOSAT weather satellite image of central Europe taken in visual passband on May 6, 2000, 12 UT. Image courtesy Czech Hydrometeorological Institute and Eumetsat

Bolid Moravka, dane obserwacyjne

- **relacje świadków,**
- **rejestracje wideo,**
- **dane sejsmiczne,**
- **sygnały infradźwiękowe** (0.01-20 Hz)
- **rejestracje satelitarne:** czujniki w paśmie wizualnym i podczerwieni, (system satelitarny DoD)

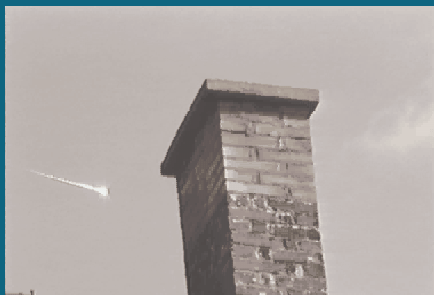
Bolid Moravka: Maj, 6, 2000, 13:52 LT



Trajektoria bolidu

TABLE 2. Basic data on the video records

Site	Longitude	Latitude	Altitude [m]	Field of view	Record length	No of positions	Format	Author
Janov	17.47553	50.24275	422	8×11°	1 s	25	Hi-8	J.Fabig
Kunovice	17.43967	49.03219	175	1.6×2.1°	3.1 s	43	Hi-8	J.Misak
Javorina	17.67950	48.85789	952	35×45°	0.8 s	20	VHS	J.Gurnak



Rejestracje wideo

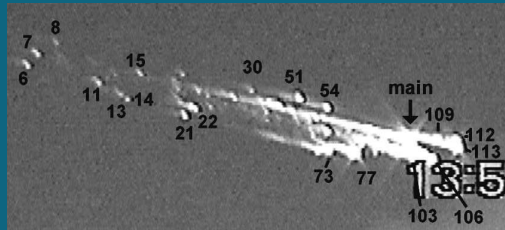


FIG. 35. The image of the fireball at time 0.10 s from Kunovice video with some fragments numbered.

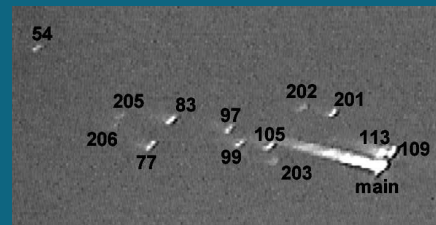


FIG. 36. The image of the fireball at time 0.86 s from Kunovice video with fragments numbered.

Bolid Moravka, dane obserwacyjne

- relacje świadków,
- rejestracje wideo,
- dane sejsmiczne,
- sygnały infradźwiękowe (0.01-20 Hz)
- rejestracje satelitarne: czujniki w paśmie wizualnym i podczerwieni, (system satelitarny DoD)



FIG. 45. The landscape in the fall area. View from Polomka (18.56° E, 49.51° N) to the north. The fall area extends behind the horizon, which is about 12 km distant.

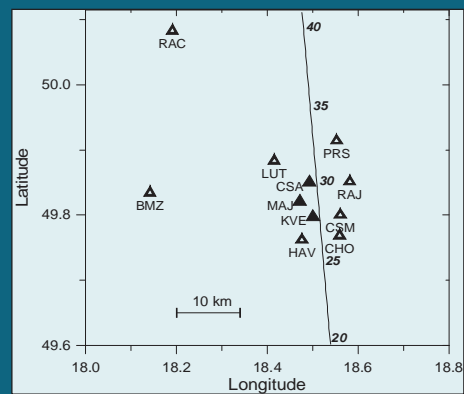
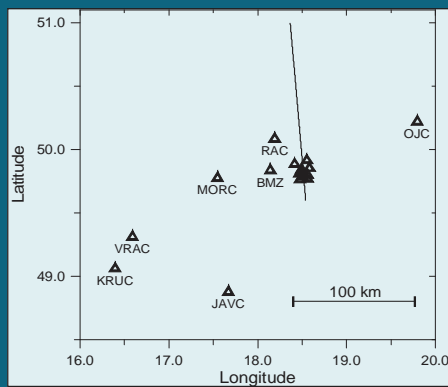
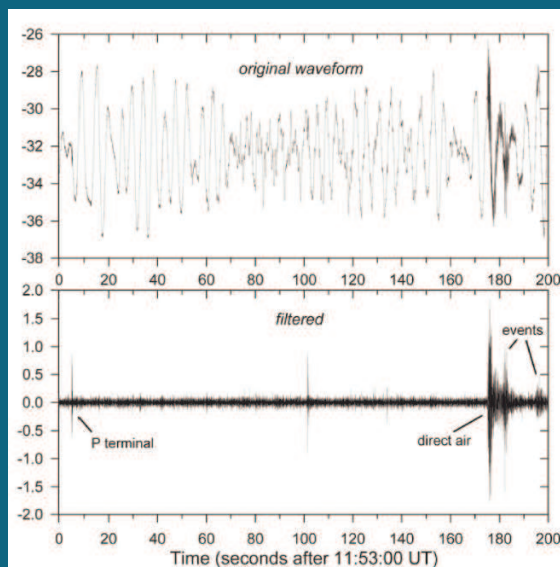


FIG. 22. Positions of seismic stations relative to the fireball trajectory as derived from the video records. The right panel represents detailed view of the central part. Fireball altitudes in km are given in this part. Deep underground stations are plotted as filled triangles.

Seismic data: description and interpretation

TABLE 8. List of seismic stations which detected Morávka fireball

Code	Location	Operator	Longitude [° E]	Latitude [° N]	Altitude [m]	Depth [m]
CSM	CSM mine	DPB	18.5608	49.8004	278	0
RAJ	Karvina-Raj	DPB	18.5817	49.8514	272	30
LUT	Orlova-Lutyne	DPB	18.4150	49.8832	217	30
PRS	Prstna	DPB	18.5528	49.9143	205	30
BMZ	Ostrava-Krasne Pole	DPB	18.1411	49.8344	250	17
HAV	Havirov	DPB	18.4763	49.7619	301	30
CHO	Chotebuz	DPB	18.5594	49.7682	301	30
MAJ	Maj mine	DPB	18.4713	49.8237	-365	575
CSA	CSA mine	DPB	18.4925	49.8531	-497	717
KVE	Kveten mine	DPB	18.5007	49.8003	-141	350
RAC	Raciborz	PAN	18.1905	50.0829	214	2
OJC	Ojcow	PAN	19.7972	50.2187	300	0
VRAC	Vranov	MU	16.5888	49.3092	470	5
MORC	Moravsky Beroun	MU	17.5458	49.7752	742	5
KRUC	Moravsky Krumlov	MU	16.3939	49.0611	341	0
JAVC	Velka Javorina	MU	17.6695	48.8749	827	0

Pomiary sejsmograficzne
w stacji MORC

Zapis oryginalnego sygnału

Sygnał po odfiltrowaniu
niskich częstotliwości (<25Hz)

Bolid Moravka, dane obserwacyjne

- relacje świadków,
- rejestracje wideo,
- dane sejsmiczne,
- sygnały infradźwiękowe, (0.01-20 Hz)
- rejestracje satelitarne: czujniki w paśmie wizualnym i podczerwieni, (system satelitarny DoD)

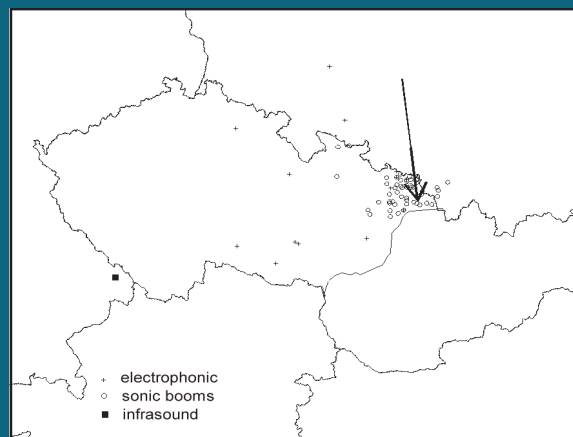
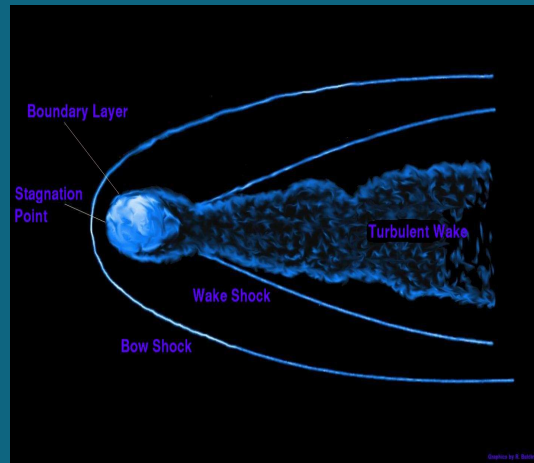


FIG. 3. Geographical distribution of the received reports of fireball electrophonic sounds and sonic booms. The location of the infrasonic array in Freyung is also shown.

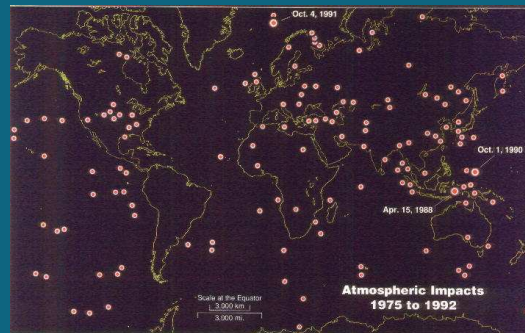
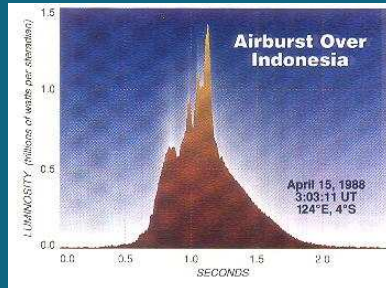
Dygresja. Turbulent wake



Bolid Moravka, dane obserwacyjne

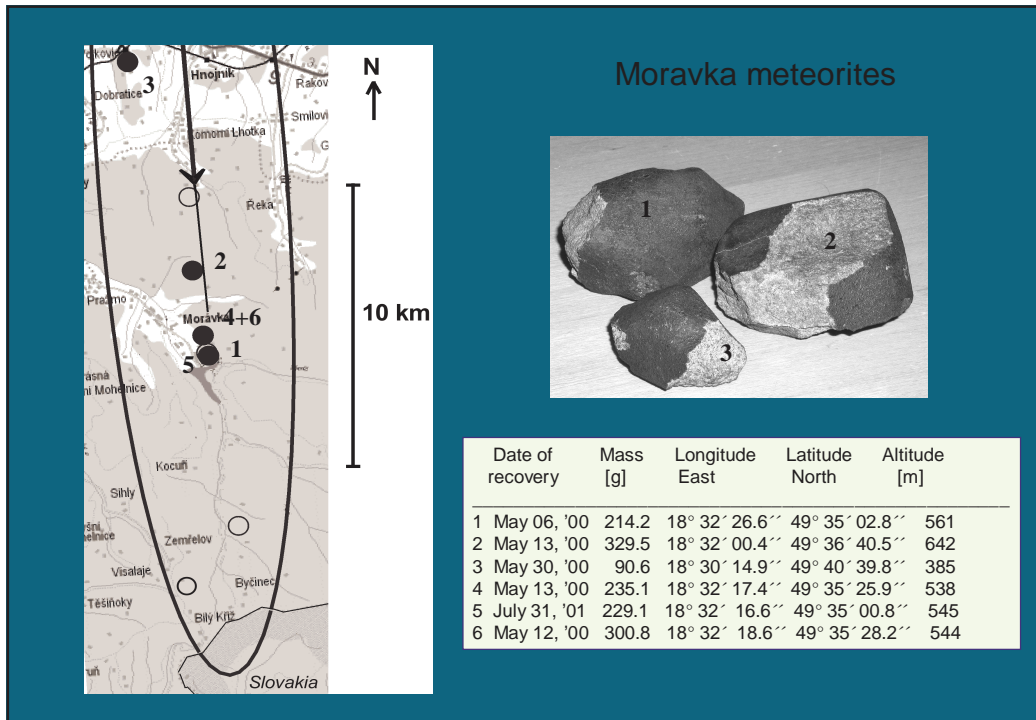
- relacje świadków,
- rejestracje wideo,
- dane sejsmiczne,
- sygnały infradźwiękowe, (0.01-20 Hz)
- rejestracje satelitarne: czujniki w paśmie wizualnym i podczerwieni, (system satelitarny DoD)

Dygresja. Satelitarne obserwacje bolidów.



Rezultaty

- **meteoryt Moravka**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**



Rezultaty

- **meteoryt Moravka,**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**

TABLE 4. Radiant and initial velocity

	apparent	geocentric (J2000.0)	heliocentric
Azimuth	$175.5^\circ \pm 0.4^\circ$		
Elevation	$20.4^\circ \pm 0.2^\circ$		
Right ascension	$249.75^\circ \pm 0.8^\circ$	$250.1^\circ \pm 0.7^\circ$	
Declination	$60.58^\circ \pm 0.16^\circ$	$54.96^\circ \pm 0.24^\circ$	
Velocity [km/s]	22.5 ± 0.3 km/s	19.6 ± 0.4 km/s	35.75 ± 0.3 km/s
Ecliptical longitude			$145.0^\circ \pm 0.3^\circ$
Ecliptical latitude			$31.9^\circ \pm 0.5^\circ$

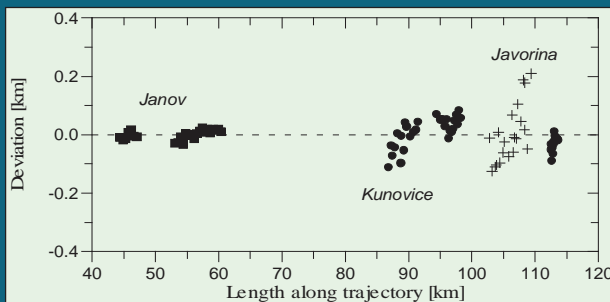


FIG. 11. The deviations of individual positions measured on video records from the computed fireball trajectory.

TABLE 5. Heliocentric orbit (J2000.0)

<i>a</i>	1.85 ± 0.07 AU
<i>e</i>	0.47 ± 0.02
<i>q</i>	0.9823 ± 0.0009 AU
<i>Q</i>	2.71 ± 0.13 AU
ω	$203.5^\circ \pm 0.6^\circ$
Ω	46.2580°
<i>i</i>	$32.2^\circ \pm 0.5^\circ$
<i>P</i>	2.51 ± 0.14 years
<i>T</i>	Nov 21, 1997 \pm 49 days

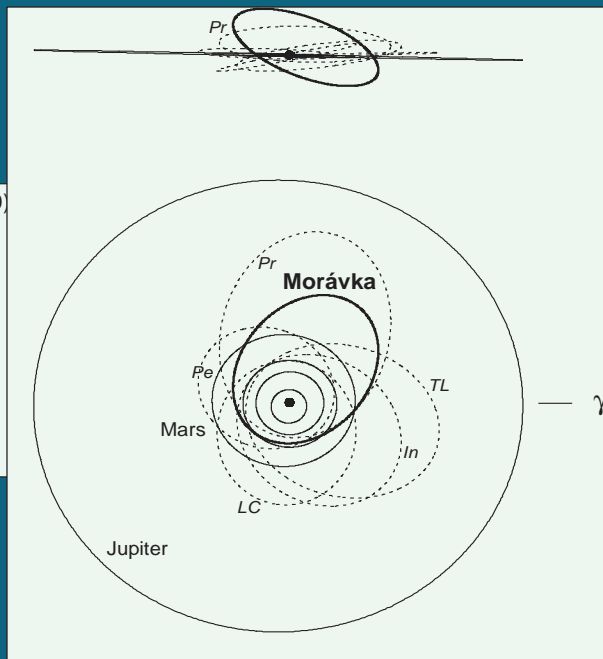


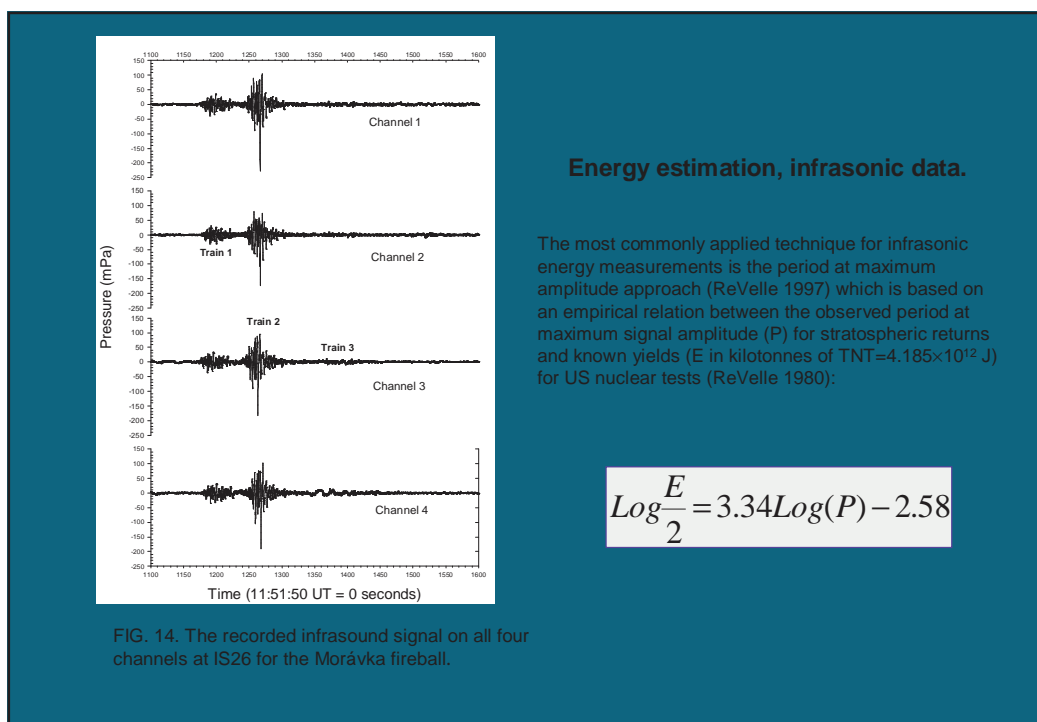
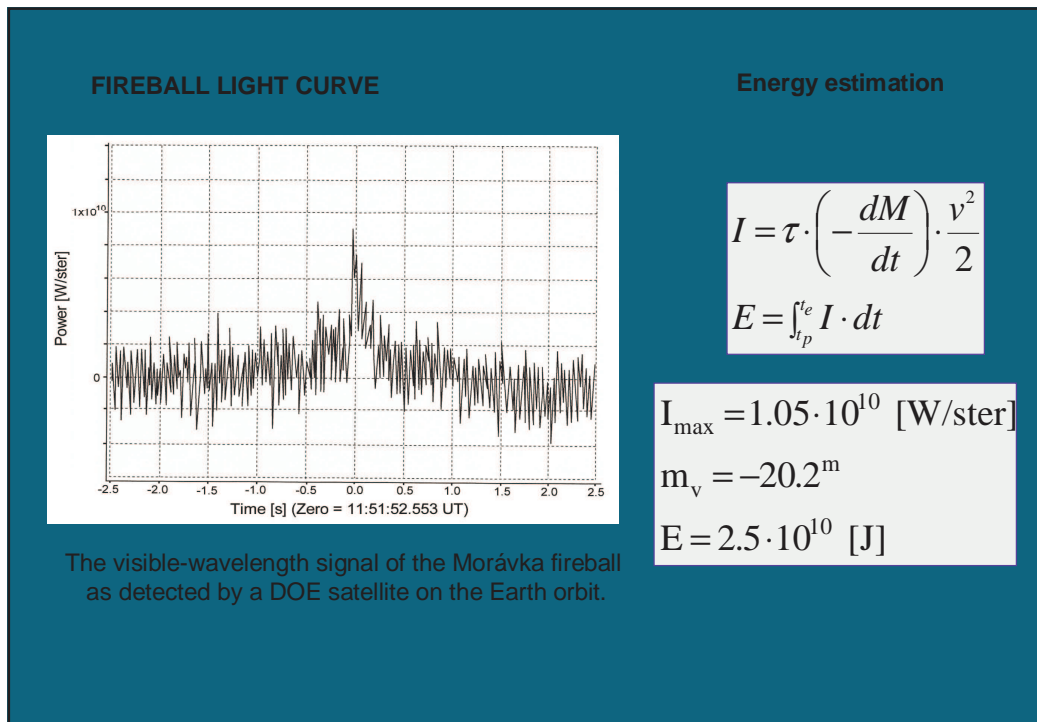
TABLE 6. **Known orbits of meteorites.** The date (UT) and local time of the fall and the classification are also given for each meteorite.

	Morávka	Pribram	Lost City	Innisfree	Peekskill	Tagish L.
	2000	1959	1970	1977	1992	2000
	05-06	04-07	01-04	02-06	10-09	01-18
	1 pm	8 pm	8 pm	7 pm	7 pm	8 am
	H 5-6	H 5	H 5	LL 5-6	H 6	C
	(J2000.0)	(1950.0)	(1950.0)	(1950.0)	(J2000.0)	(J2000.0)

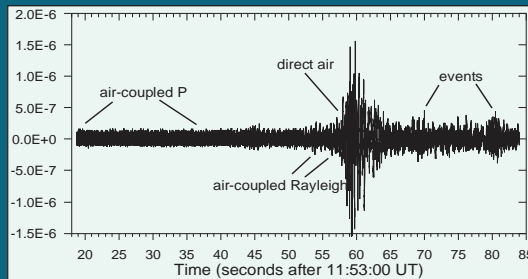
<i>A</i>	1.85	2.424	1.66	1.872	1.49	2.1
<i>E</i>	0.47	0.6742	0.417	0.4732	0.41	0.57
<i>Q</i>	0.9823	0.7890	0.967	0.986	0.886	0.891
<i>Q</i>	2.71	4.06	2.35	2.758	2.10	3.3
ω	203.5	241.583	161.0	177.97	308.	222.
Ω	46.258	17.111	283.0	316.80	17.030	297.900
<i>i</i>	32.2	10.424	12.0	12.27	4.9	1.4

Rezultaty

- **meteoryt Moravka,**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**



Energy estimation, seismic data.



Brown et al. (2000) proposed a formula relating the equivalent energy (E in kT TNT), The range to the source, R (in meters) and the average vertical ground motion of the Rayleigh waves, D_v (in nm/s)

$$E = \chi \gamma^{-1} R^2 \cdot (9.748 \cdot 10^{-11} D_v)^{1.738}$$

FIG. 23. Seismic record from station BMZ and the description of individual wave groups. The time is given in seconds after 11:53:00 UT. The first P-waves arrived before the start of the record.

The y-axis vertical ground velocity [m/s]

Summary of energy, mass and size estimates

TABLE 12. The estimates of Morávka meteoroid pre-atmospheric mass, energy, and diameter from various types of data.

Data type	Mass [kg]	Energy [kT TNT= 4.185×10^{12} J]	Diameter [m]	Reference
Radiation	1400 (800–3500)	0.08 (0.05–0.20)	0.90 (0.75–1.2)	this work
Infrasound	1600 (800–2500)	0.10 ± 0.05	0.95 (0.75–1.1)	this work
Noble gases	1400 (400–11000)	0.08 (0.025–0.7)	0.9 (0.6–1.8)	this work
Seismic	2100 (1000-5000)	0.13 (0.06-0.3)	1.05 (0.8-1.4)	this work
Radionuclides	300 (230–400)	0.02 ± 0.005	0.55 ± 0.05	Neder et al.(2001)
Accepted	1500 ± 600	0.09 ± 0.04	0.93 ± 0.13	

Rezultaty

- meteoryt Moravka,
- trajektoria atmosferyczna, orbita,
- energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary
- klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)
- wiek kosmiczny
- ewolucja dynamiczna
- pochodzenie

METEORITE COMPOSITION AND STRUCTURE

Methods:

- Instrumental neutron activation analysis (INAA),
- instrumental photon activation analysis (IPAA),
- radiochemical neutron activation analysis (RNAA).

The bulk elemental composition compares well with the published data for **H chondrites** (e.g. Mason 1979).

Rather scattered data were found for some elements, namely Fe, Co and Ni. These variations are due to inhomogeneous distribution of metallic, mainly iron grains in the analyzed samples.

The bulk density of meteorites 1–3 was determined by measuring the mass and the volume of whole specimens.

The weighted average of the density is $3.59 \pm 0.06 \text{ g/cm}^3$.

This is higher than the average density of H chondrites found by Wilkinson and Robinson (2000), 3.44 g/cm^3 , but within the range they found ($2.87\text{--}3.74 \text{ g/cm}^3$)

TABLE R1. Elemental abundances in the Morávka meteorite

Element, Unit	Method ^a	Ablation crust 13.10 mg	Metallic grains 2.108 mg	Bulk 13–500 mg	Ratio to H chondrites
Na %	INAA	0.523 ± 0.016	0.115 ± 0.005	0.582 ± 0.038 (4)	0.91 ± 0.06
Mg %	INAA, IPAA	13.86 ± 0.42	2.99 ± 0.10	16.17 ± 0.81 (5)	1.16 ± 0.06
Al %	INAA	1.100 ± 0.033	0.253 ± 0.009	1.189 ± 0.089 (4)	1.05 ± 0.08
Si %	FINAA	12.7 ± 1.7	NA	18.1 ± 1.2 (1)	1.07 ± 0.07
Cl, µg g ⁻¹	INAA	152 ± 16	157 ± 23	58 ± 22 (4)	0.7 ± 0.3
Ca %	INAA, IPAA	1.364 ± 0.050	0.168 ± 0.021	1.450 ± 0.116 (5)	1.16 ± 0.9
Sc, µg g ⁻¹	INAA	7.98 ± 0.24	1.41 ± 0.08	8.56 ± 0.62 (2)	1.08 ± 0.8
Ti, µg g ⁻¹	INAA, IPAA	550 ± 67	133 ± 32	770 ± 83 (1)	1.28 ± 0.14
V, µg g ⁻¹	INAA	75.8 ± 2.4	41.3 ± 1.4	85.3 ± 5.1 (4)	1.15 ± 0.07
Cr, µg g ⁻¹	INAA	3250 ± 100	1748 ± 54	3828 ± 154 (2)	1.05 ± 0.04
Mn, µg g ⁻¹	INAA, IPAA	2288 ± 69	556 ± 17	2560 ± 188 (5)	1.10 ± 0.08
Fe %	INAA	30.68 ± 0.94	72.4 ± 2.2	24.03 ± 4.21 (3)	0.87 ± 0.15
Co, µg g ⁻¹	INAA	1053 ± 32	3665 ± 110	575 ± 231 (6)	0.7 ± 0.3
Ni %	INAA, IPAA	2.20 ± 0.07	5.14 ± 0.18	1.38 ± 0.42 (7)	0.86 ± 0.26

Rezultaty

- **meteoryt Moravka,**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**

Meteoroid history

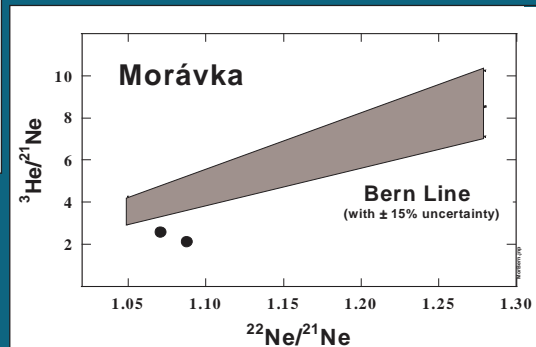
Cosmic ray exposure age

TABLE 13. Cosmic ray exposure ages (CREA)

Meteorite	CREA [Ma]			method
	³ He	²¹ Ne	³⁸ Ar	
Morávka 1	3.5	5.1	6.4	E88
	5.0	7.8	8.2	G90
Morávka 2	2.6	4.7	5.0	E88
	3.5	6.7	6.3	G90

E88 – Eugster (1988); G90 – Graf et al. (1990)

FIG. 27. The cosmogenic ³He/²¹Ne versus ²²Ne/²¹Ne ratio in two Morávka meteorites and the empirical Bern line for chondrites without ³He deficit.

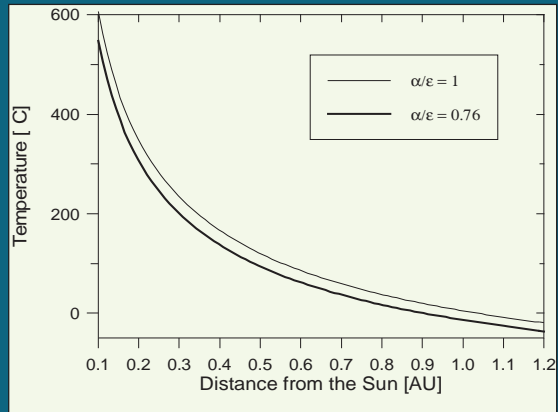


Rezultaty

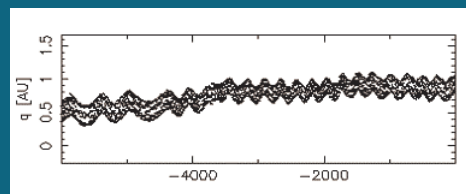
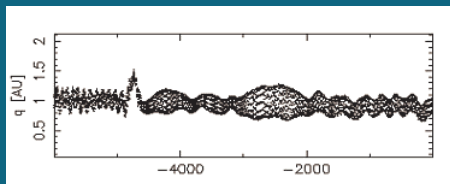
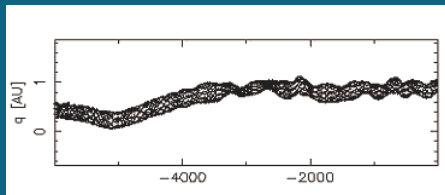
- **meteoryt Moravka,**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**

Solar heating

$$T = 278(\alpha/\epsilon \cdot 1/R^2)^{1/4}$$



Orbital history spanning 6 Myear

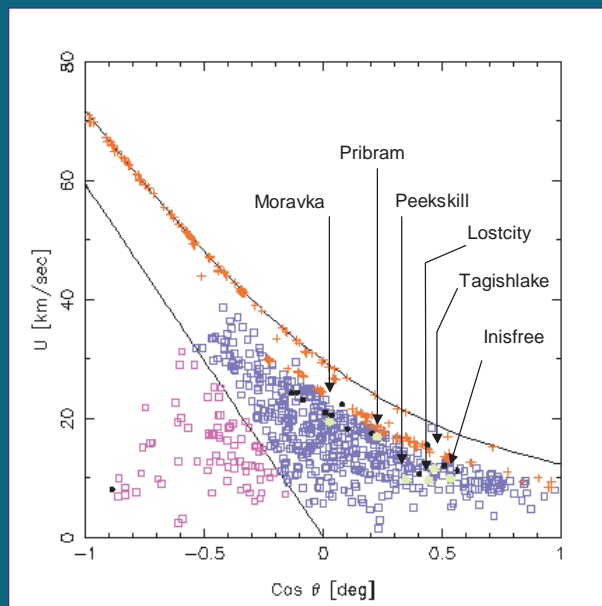


Rezultaty

- **meteoryt Moravka,**
- **trajektoria atmosferyczna, orbita,**
- **energia bolidu - początkowe: masa i rozmiary**
- **klasyfikacja, (skład chemiczny, gęstość)**
- **wiek kosmiczny**
- **ewolucja dynamiczna**
- **pochodzenie**

Pochodzenie Moravki

Płaszczyzna U-theta



Podsumowanie

6 Maja 2000, 11:51:46 - pojawienie się bolidu
 masa początkowa - 1500 kg,
 rozmiar początkowy – 90 cm [średnica]
 gęstość – 3,59 [cgs]

prędkość wejścia w atmosferę 22.5 km/sek,
 energia kinetyczna 0.1 kt TNT
 trajektoria: 175.5 azymut, 20.4 nachylenie
 obserwowany od wysokości 80 km

fragmentacja na wysokości > 46 km, ~10 części,
 ponowna fragmentacja na wysokości 37-29 km, ciśnienie dynamiczne 5 Mpa
 towarzyszy jej maksymalna jasność bolidu –20 mag.

Podsumowanie cd.

dalsza fragmentacja o kaskadowym charakterze – główny mechanizm
 dezintegracji początkowej masy meteoroidu,
 na ziemię spadła masa ok. 100 kg na obszarze
 o długości ok. 20 km.

znaleziono 6 odłamków o łącznej masie 1.4 kg

klasyfikacja - H5-6,
 chondrule stanowią 10% obj. meteorytu,
 wysoka gęstość bryłowa 3.59 [cgs],
 niski stopień porowatości,

wiek kosmiczny 6.7 Ma
 stwierdzono deficyt zawartości helu ^3He i ^4He
 historia orbitalna – możliwość znacznego
 nagrzewania przez 5 Ma