



NAGYHŐMÉRSÉKLETŰ ÉS VIZES ÁTALAKULÁSOK AZ NWA10261 CV3 METEORIT ALAPJÁN

Gyollai Ildikó ^{(1), (4)} , Kereszturi Ákos ^{(2), (4)} , Szabó Máté ⁽¹⁾, Kereszty Zsolt ^{(3), (4)}

⁽¹⁾ ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet,
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 15–17

⁽²⁾ ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Csillagászati
Intézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 15–17,

⁽³⁾ International Meteorite Collectors Association (IMCA)

⁽⁴⁾ Magyar Meteoritikai Társaság, 9024 Győr, Lahner György utca 1.
e-mail: gyildi@gmail.com

High Temperature and aqueous alteration in the NWA 10261 chondrite

Abstract

Hydrospheres in unusual forms were also present inside many small primitive planetesimals in the early Solar System. The conditions for the estimation of such wet environments requires the analysis of wet altered mineral components. The meteorite Northwest Africa 10261 (NWA10261) was found by a nomad collector in Morocco, and purchased by *Zs. Kereszty* private collector in 2014. The NWA 10261 meteorite was classified as CV3 chondrite by the authors of this work, which were approved by [1 – Meteoritical Bulletin], 2016. The aim of this work is the correlated optical microscopy and SEM-BSE, SEM-EDX analyses of this recently found new meteorite, which shows high abundance of AOA and CAI components, in order to get more insight into the formation of such grains, focusing on their mineral and chemical characteristics with special emphasis on one unique CAI grain. Aqueous alteration with extraterrestrial origin, indicated by pleonast rim of spinel-bearing CAIs, and fayalite and Fe-bearing pyroxenes at the rims of CAIs and AOAs. The higher amount of iron oxides both of matrix and fractures in chondrules could have extraterrestrial origin. Although wet weathering happened inside this and several other meteorites, these processes worked mainly in small spatial scales and possibly no global circulation and interaction happened inside these planetesimals. As a result the term hydrosphere should be used with caution for such bodies despite water might have been present in large part of their volume for a short early period.

Keywords: aqueous alteration, high temperature alteration, carbonaceous chondrite, CAI, AOA, chondrules, meteorites

Összefoglalás

Hidroszférák (H₂O) szokatlan formában sok apró, primitív égitestben lehettek jelen a fiatal Naprendszerben. E viszonyok megbecslésében a vizes ásványi átalakulások elemzése segít. Az NWA 10261 meteoritot egy marokkói nomád gyűjtő találta, amit *Kereszty Zsolt* vásárolt meg 2014-ben. A meteorit besorolása az CSFK FGI laboratóriumaiban történt, ami optikai, infravörös spektroszkópiai mérések, és visszaszórt elektronmikroszkópos módszer révén CV3 típusnak bizonyult. A vizsgálatok alapján az NWA 10261 nagy számban tartalmaz amőboid olivin és CAI (kalcium-alumínium-oxid) zárványokat. A nagyhőmérsékletű átalakulás a CAI szemcséken történt, míg a vizes átalakulás a CAI szemcsék peremén és kondrumokban zajlott.

A CAI-k peremén a vizes átalakulást a pleonaszt spinell (spinell szemcse vasasodása a peremek mentén), CAI-k és AOA (amőboid olivin) szemcsék peremén fayalit és vastartalmú piroxén jelenléte igazolja. A kondrumok átalakulása során a vas-oxidok lehetnek nem földi eredetűek is, mivel nemcsak a repedések mentén, hanem a kondrum alapanyagában és a kondrumok peremén is gyakoriak, főleg az akkréciós peremek finomszemcsés anyagában jellemzőek. Noha ebben és sok más meteoritban történtek vizes átalakulások, ezek nyomai főleg kis méretskálán jelentkeznek, feltehetőleg ritkán volt globálisan kölcsönható, kiterjedt áramlási rendszer az ilyen ősi objektumokban. Ennek megfelelően a hidroszféra kifejezés csak korlátozottan alkalmazható rájuk, noha sok esetben az égitestek térfogatának jelentős részében fordulhatott elő folyékony H₂O.

Kulcsszavak: vizes átalakulás, nagy hőmérsékletű átalakulás, szenes kondrit, CAI, AOA kondrumok, meteoritok

Bevezetés

Az NWA 10261 meteoritot egy nomád gyűjtő találta meg Marokkóban, amit *Kereszty Zsolt* vásárolt meg. Ezt a meteoritot a szerzők CV3 típusúként sorolták be, ami az NWA10261 sorszámot kapta és a [1 – Meteoritical Bulletin] 2016-os számában jelent meg. A mintát optikai mikroszkóppal és elektronmikroszondával (SEM-BSE, SEM-EDX), továbbá infravörös mikroszkóppal vizsgáltuk (SEM – Scanning Electron Microscope, pásztázó elektronmikroszkóp).

A meteorit érdekessége a viszonylag nagy és gyakori amőboid olivin – halmazok (AOA) és kalcium-alumínium (CAI) zárványok jelenléte. A nagyhőmérsékletű ásványi átalakulások vizsgálata CAI szemcsék elemzéses alapján történt (*1. ábra*), a vizes átalakulást pedig a kondrum-szövetek alapján vizsgáltuk. A meteorit a CV3 szenes kondritok közé sorolható, ami az 1910-ben Olaszországban lehullott Vigarano meteoritról kapta a nevét. A mintában nagy kondrumok találhatóak, közel 40% a mátrix aránya.

Vizsgálati módszerek

A szöveti elemzés NICON Eclipse E600 POL polarizációs mikroszkóppal történt, 4×, 10×, 20×, 40× nagyítású objektívvel, áteső és ráeső fényben. Az ásványtani elemzéshez Bruker VERTEX70 spektroszkópot és HYPERION 2000 FTIR-ATR mikroszkópot (MCT-A detektor) használtunk. Mérési paraméterek: 30 scan/mérés 4 cm⁻¹ spektrális felbontás, és elemzés Bruker Optics' Opus 5.5 software segítségével.

A kémiai elemzést elektronmikroszondával (EMPA) végeztünk: 1 – 2 μm térbeli felbontással, vákuum alatt szenezett vékonycsiszolaton, (JEOL Superprobe 733 INCA Energy 200 Oxford Instrument EDS műszerrel). Mérési paraméterek: 20 keV gyorsító feszültség, 6 nA elektronsugár áramerősség, 60 s detektálási idő.

Eredmények

Az alábbiakban a meteorit osztályozását, majd egy általános jellemzés után az I21, a J71 és a H51 jelű elegyrészeket, majd néhány további nagyobb elegyrészt mutatunk be példaként.

Osztályozás

A CV3 kondritok közé való besorolás elsősorban az ásványos összetétel alapján történt, ahol olivin és piroxén Fe-Mg arányát mértük meg (N: darabszám, cpx: klinopiroxén, opx: ortopiroxszén, Fa: fayalit, Fo: forsterit, Fs: ferroszilit, Wo: wollasztonit):

- olivin Fa (26,3 ±27,7), Fo 20,6–78,8 (N = 58);
- cpx: Fs = (12,2 ±8,9) 0–30,8 (N = 21), Wo = (24,5 ±14,5) 5,5 – 45,3, (N = 21);
- opx: (Fs = 7,7 ±5,7), 0–20,6 (N = 14), Wo = (1,9 ±1,9) 0,0 – 4,7 (N = 14).

A fő elegyrészek olivin, piroxén, opak ásványok (troilit, magnetit, pentlandit), valamint kevés földpát voltak.

A mintában tucatnyi 2 mm–1 cm átmérőjű AOA szemcse (25% a minta területének), és kevés CAI szemcse is található. Továbbá a mintában megfigyelhető kondrumok aránya 36%, méretük 0,2–2,6 mm (átlag: 0,8 mm) között változik, a finomszemcsés mátrix aránya 38%. A mozaikos kioltású olivin, mechanikai ikres piroxének és a mintában megfigyelhető repedések alapján a Stöffler-skála szerinti S3 sokkszint határozható meg. Mivel 70–90%-a az opak ásványoknak oxidált, az opak erek vas-oxidokká alakultak, a meteorit W3 mállási fokozatba sorolható.

A T-J71 CAI (kalcium-alumínium-zárvány) szemcse

Magas hőmérsékletű átalakulás nyomát a T-J71 jelű CAI szemcse egy 200 µm átmérőjű területén elemeztük.

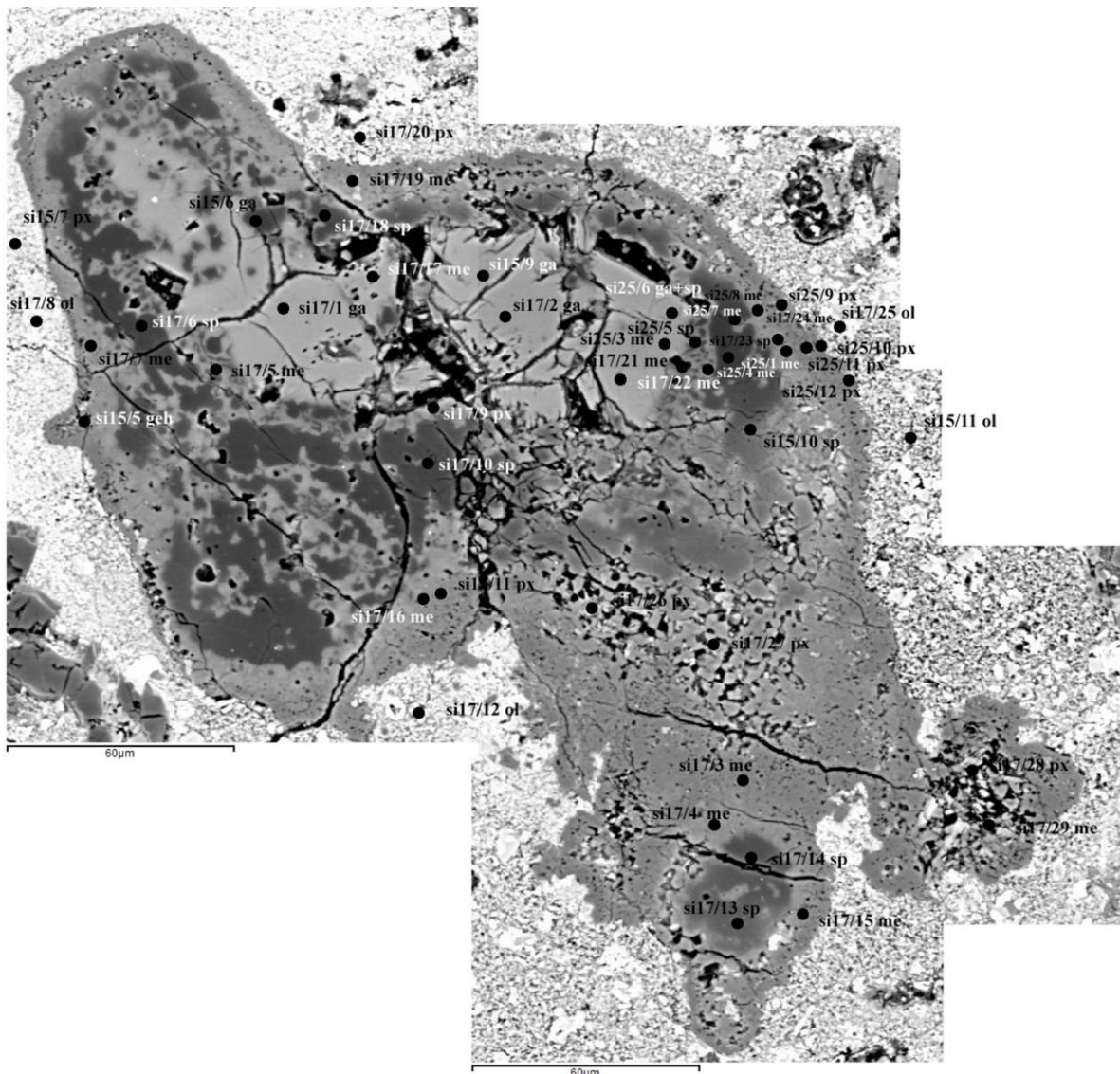
A visszaszórtelektron-kép alapján a CAI szemcsében több zónát is sikerült elkülöníteni (1. ábra).

- Belső, töredezett homogén zóna – gránátszemcse, repedéseit spinell melilit tölti ki.
- „A” körül inhomogén zóna sötét és világos területekkel – spinell és melilit.
- Világos finomszemcsés piroxén melilittel.
- Finomszemcsés melilit.
- Finomszemcsés olivin kevés piroxénnel és melilittel.
- Szürke homogén piroxén-melilit zóna.

A T-J71 CAI szemcsét (kalcium-alumínium-zárvány) alkotó ásványok alapján durván a meteorit alábbi hőtörténeti fejlődése is rekonstruálható:

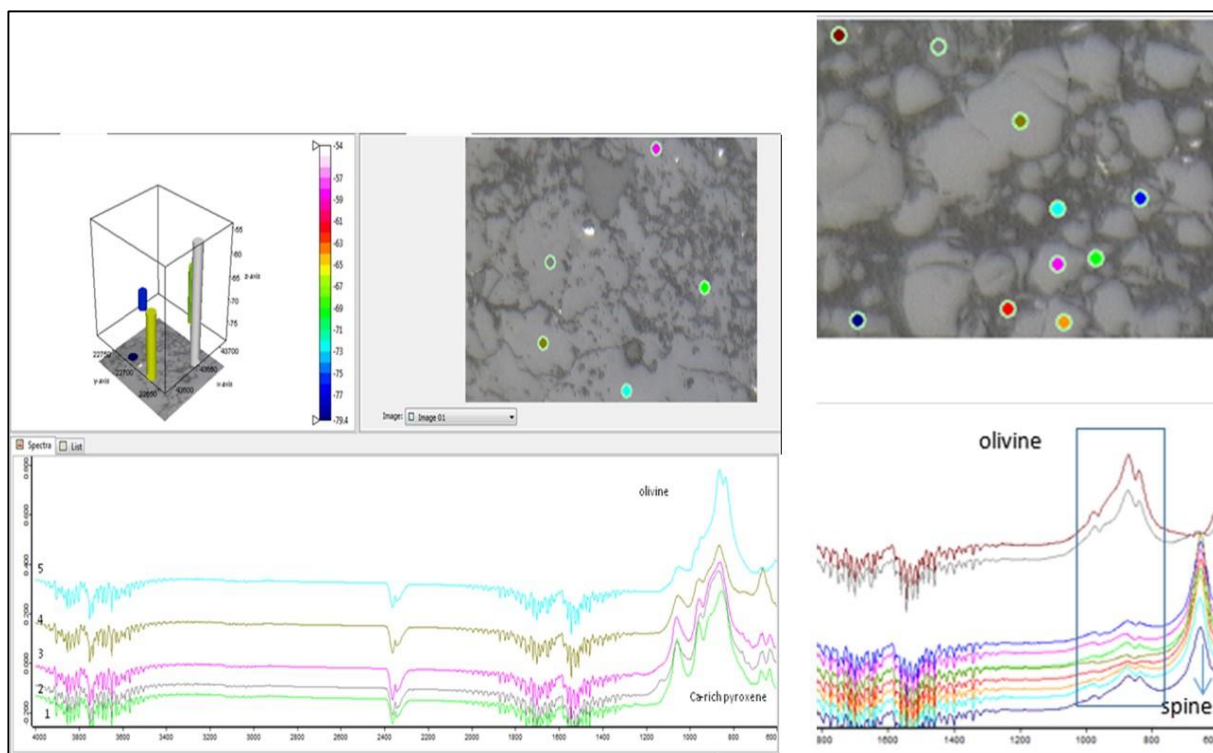
- gránátos mag 1073–1313 K (A-zóna) keletkezése;
- spinell-melilit gazdag belső perem keletkezése 1513–1625 K hőmérsékleten (B-zóna);
- melilit + fasszait keletkezése 1528 K, amelyet Fe-metaszomatózis követett 800 K alatti hőmérsékleten (C-zóna);
- akermanitképződés 1475 K (D-zóna);
- melilit, fasszait és diopszid 1450–1568 K (E-zóna);
- FeNi, forsterit, diopszid, ensztatit (F-zóna) 1443–1473 K.

Irodalmi adatok alapján (2. ábra, 1. táblázat) (Blander & Fuchs, 1975; Grossmann, 1975; Kimura et al., 2003; Kawasaki et al., 2012) a kalcium-alumínium zárvány (CAI) vas metaszomatózisa akkor történt, amikor a Naprendszer kialakító ösködben 800 °C alatt volt a hőmérséklet. Ez figyelhető meg a T-J71 és T-I21 jelű CAI szemcsék vasgazdag pleonasztos spinelljeiben is.



1. ábra: A T-J71 CAI (kalcium-alumínium zárvány) BSE (visszaszórt elektron) térképe. A mérési pontokat „si” (site interest) és szám azonosítóval jelöltük, az azonosított ásványok a fekete pontok mellett olvashatók: Mel (me) = melilit, Sp = spinell, Ol = olivin, Gh (geh) = gehlenit, Px = piroxén, Grt (ga) = gránát.

Figure 1: The BSE image of T-J71 CAI. The measuring points are marked by „si” (site interest and numbers). The identified minerals were marked as follows after the measuring points: Mel (me) = melilite, Sp = spinel, Ol = olivine, Gh (geh) = gehlenite, Px = pyroxene, Grt (ga) = garnet.



2. ábra: Infravörös spektroszkópia: vastartalmú pleonasztos spinell olivinek és diopszid mellett az T-I21 kalcium-alumínium zárványban (CAI).

Figure 2: Infrared spectroscopic measurements: Fe containing (pleonast) spinel grains next to olivine and diopside in the CAI numbered T-I21.

Kondenzációs folyamatok háttere az ősködben

A kondrumok porózus, akkréciós eredetű pereme a kondenzációs folyamatok alatt jött létre, melyek agglomerátumokként tömörödhetnek (Ormel et al., 2008). Idővel az agglomerátumok nagyobbak lesznek, ezek ősbolygókká (planetizimálokká) állhatnak össze (Ormel et al., 2008). Tehát az akkréciós peremek létrejöttének megértése fontos a kis égitestek fejlődésének rekonstrukciójához. Az 1-es típusú kondrumok három rétegből állnak ezek (H51, D7-1 D5-1, L-J71, D11 kondrumok):

1. olivin-fenokristályok a kondrum belsejében;
2. e körül enzstatitzemcsék;
3. finomszemcsés vas-oxidos mikrokondrumokkal (< 100 μm), melyek az akkréciós peremen csapdázódnak (Jacquet et al., 2015). Bigolski et al. (2014 és 2016) alapján viszont a finom-szemcsés peremek 20%-a mikrokondrum, melyek többlépcsős hőhatás eredményeképpen keletkeztek.

Finomszemcsés peremeket más CV3 kondritok kondrumainál is leírtak már, mint például az Allende meteoritban: jellemző rájuk a finomszemcsés héjtől jól elkülönülve, éles peremmel rendelkeznek (King & King, 1981; MacPherson et al., 1985; Hewins et al., 1996). Finom-szemcsés átalakult ásványtársulások a kondrumok mátrixában is előfordulhatnak, melyek magas és alacsony hőmérsékletű folyamatok eredményeképpen is létrejöhetnek, de itt a kondrit alapanyagában csak alacsony-hőmérsékletű folyamatok hozták létre azokat (Mokoia meteorit – Hua et al., 1996). Legvastagabb akkréciós peremet a CM kondritokban figyelték meg, ami

akár 300 μm -es is lehet. A változó szövet különböző eredetre (Metzler et al., 1992) és metasomatózisa utal (Brearley & Krot, 2012.) Mikrokon drumok az akkréciós peremekben ugyanakkor kondrumok ütközése folyamán kilökődött szemcsékből is keletkezhetnek (Dobrică & Bearley, 2016). Az itt bemutatott akkréciós peremekre a későbbi alfejezetben mutatunk példát az általunk vizsgált meteoritból.

1. Táblázat: CAI (kalcium alumínium-zárvány) ásványok képződése szakirodalmak alapján és előfordulása a T-J71 CAI-ban.

Table 1: Summary of forming temperature of minerals.

Ásvány	Képződési hőmérséklet	Irodalom	Előfordulása a J71 CAI-ban
melilit + fasszait eutektikus olvadék	1520 – 1568 K	Kawasaki et al., 2012	C- és E-zóna
gehlenit $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	1625 K	Blander & Fuchs, 1975	B-zóna
spinell MgAl_2O_4	1513 K	Blander & Fuchs, 1975	B-zóna
FeNi	1473 K	Blander & Fuchs, 1975	mátrix (F zóna)
diopszid $(\text{Ca},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$	1450 K	Blander & Fuchs, 1975	E- és F- zóna
forsterit Mg_2SiO_4	1444 K	Blander & Fuchs, 1975	mátrix (F-zóna)
ensztatit $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	1349 K	Blander & Fuchs, 1975	matrix (F-zóna)
grosszulár $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	1073 K	Blander & Fuchs, 1975	A-zóna
Ti-Al gazdag piroxén (fasszait)	1550 K	Grossman, 1975	B-zóna
akermanit – $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	1475 K	Grossman, 1975	D-zóna
CAI Fe metasomatózisa	1073 K alatt oxidatív környezet	Grossman, 1975	C-zóna
pirop ($\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) (kevés almandinnal ($\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) valamint grosszular (zöld gránát) komponens $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$)	metamorf 2 – 4,2 GPa, 1213 – 1353 K	Kimura et al., 2003	A-zóna

Vizes átalakulás az opak ásványokban

Az átalakult kondrumok, valamint az akkréciós peremek fontos alkotói az opak ásványok, melyek a finomszemcsés mátrixban is gyakoriak. Elsődleges opak ásvány a kamacit és a ténit amelyek többlépcsős átalakulási folyamatban troilitté (kénes gázok hatására, Hutchison & Alexander, 1987) és magnetitté (oxidáció) alakulnak, végül pedig a vas-oxi-hidroxidok létrejötte az alacsony hőmérsékletű folyamatok eredménye. Az opak ásványok 70–81%-a vas-oxidokká alakult át ebben a meteoritban. Az elsődleges troilit gömb formában fordul elő a kondrumokban, ezek eredetileg mikrokondrumok lehettek, melyek akkréciós folyamatok során épülhettek be a szilikát-kondrumokba. A kevésbé mállott opak ásványok lamellás szerkezetet mutatnak (magnetit-troilit), melyet a 300 µm átmérőjű J31 kondrumban lehet megfigyelni.

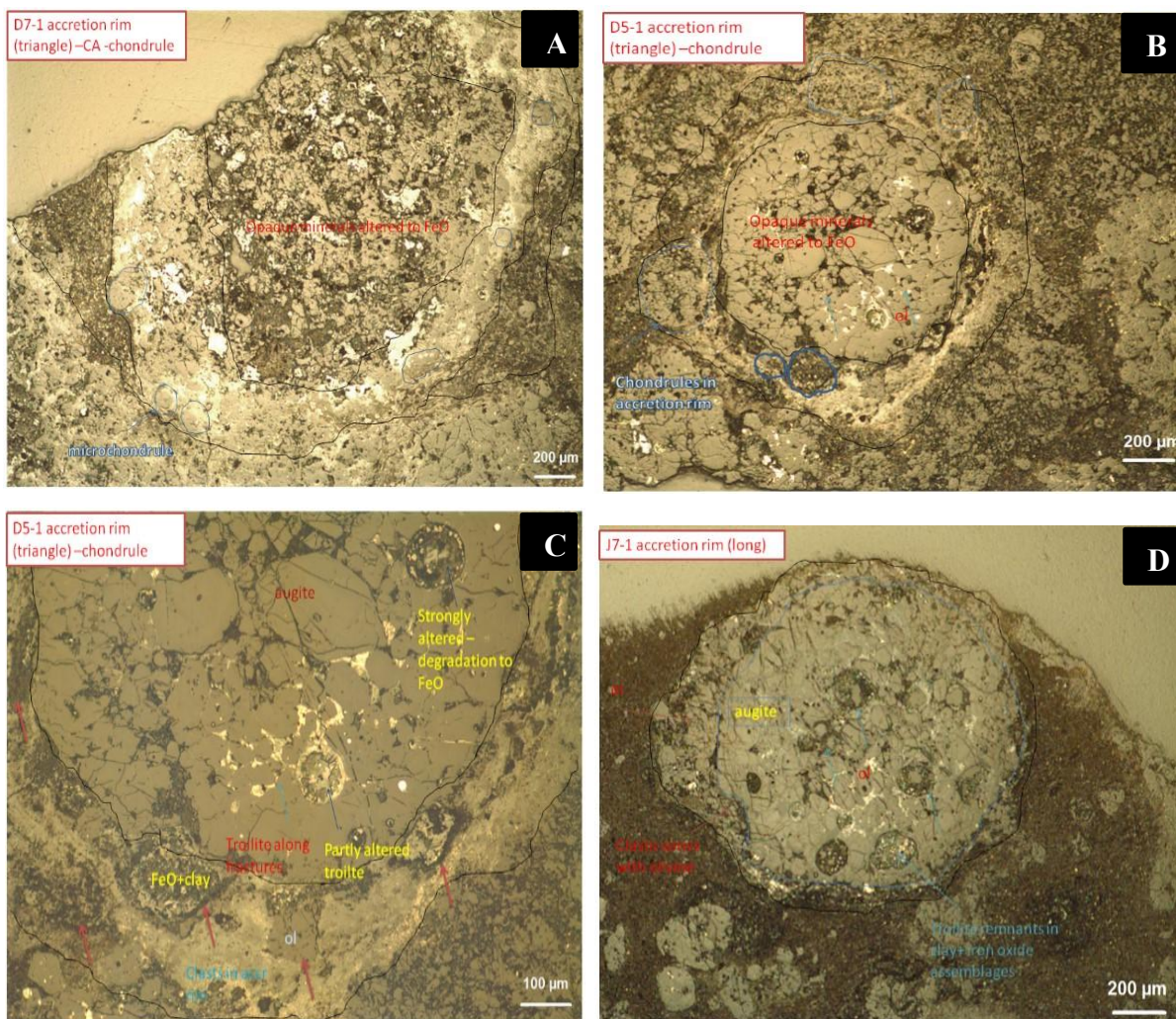
A háromszög alakú csiszolatban a nagyobb opak ásványok (70–100 µm) kevésbé alakultak át vizes oldatok hatására: a kamacit-ténit szemcsék körül magnetit átalakulási perem van, míg a troilit szemcsékben vas-oxidos repedések mutatkoznak. A kisebb szemcseméretű opak ásványok jobban átalakultak. A D71 kondrumban a magnetit teljesen átalakult vas-oxid ásványok halmazává, csak vékony perem maradt meg. A troilit szemcse szivacsos szövetű a vizes átalakulás miatt, és a pórustérben vas-oxidok mutathatók ki (hematit, goethit). Az F71 granuláris szövetű kondrumban az opak ásványok nagyobbak, viszonylag jól megőrződtek, melyek mikrokondrumokként és repedéskitöltő fázisként fordulnak elő. Ezeket a mikrogömböket (80–100 µm) troilit-pentlandit-magnetit, vagy ténit-pentlandit, továbbá ténit-magnetit alkotja. Az F51 és F52 kondrumokban a troilit jobban megőrződött, csak magnetites átalakulási perem található, de a vizes átalakulás az üregekben és a repedésekben előrehaladottabb. Az L-I21 kondrumban az opak ásványok porózus szerkezetűek, melyet magnetit, troilit, és vas-oxid ásványok alkotnak. Az I22 kondrum erősen átalakult, 90%-a a vas-oxid ásványoknak opak ásványokká alakult.

A vas-oxidok, a mérések szerint goethit és hematit, nemcsak a nyílt repedésekben, hanem korábbi folyamatok során bezáródott repedésekben és zárt pórustérben is előfordulnak, ezért nem valószínűsíthető hogy földi mállás során jöttek létre. A kamacit-ténit szemcsék és a troilitok körül magnetites átalakulási perem fordul elő.

Általában a földi mállás során létrejövő mállási termékek a fúziós kéreg mentén találhatóak, ahol az Észak-Afrikában talált (NWA) kondritok esetén sivatagi máz keletkezik. A vizsgált meteoritból készült vékonycsiszolat a meteorit belső részéből készült (*Kereszty Zs. megállapításai*).

Akkréciós peremek a szilikátkondrumok körül

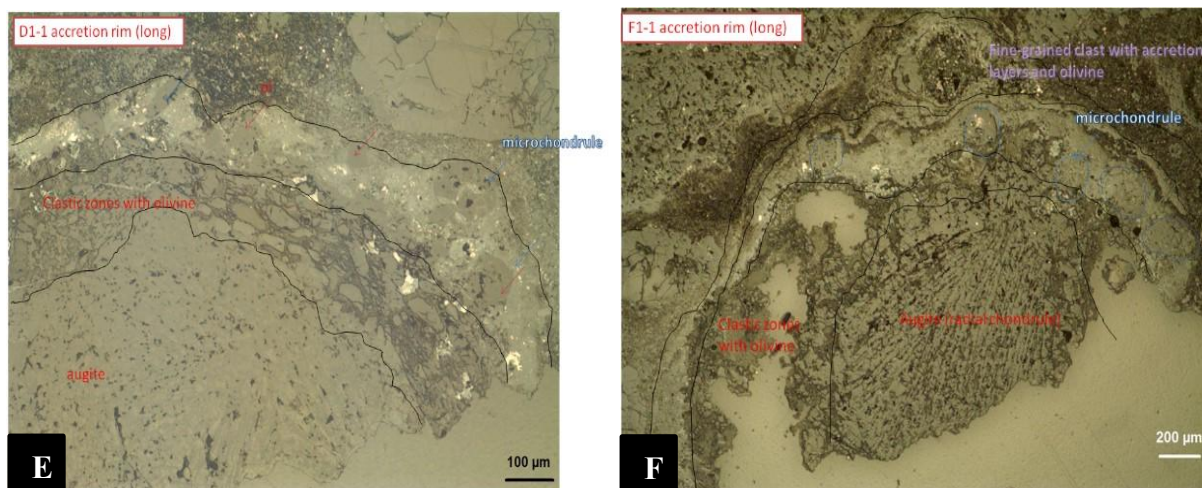
Kompakció hatására a finomszemcsés kondrumperem rétegzett szerkezetűvé alakulhat át, ami részben vas-oxid ásványok halmazává módosulhat, melyek részben 30–40 µm-es aggregátum jellegű egységeket alkotnak (T-D51, T-D71, L-H31, L-K31 kondrumok), a szemcseközi térben az üregeket helyenként finomszemcsés ásványok (T-D5-1, L-H51, L-H31), vas-oxidok (T-G41, L-G71), troilitek (T-G4-1, L-K31) és szilikát ásványtöredékek alkotják.



3. ábra A-D: A) D71 jelű kondrum: akkréciós perem finomszemcsés aggregátumokká tömörödött össze és mikrokondrumokat tartalmaz. Az akkréciós peremet alkotó finomszemcsés anyag és az aggregátumok ásványos összetétele megegyezik. A szemcseközi teret finomszemcsés ásványok és troilit tölti ki. B) D5-1 kondrum törmelékes rétegzett akkréciós peremmel. C) A T-D5-1 kondrum akkréciós peremének nagyított képe, melyben az olivin repedéseit vas-oxidok töltik ki. D) A L-J71 kondrum törmelékes akkréciós pereme, melyben mikrokondrumok is találhatóak. A repedéseket vas-oxidok töltik ki.

Figure 3.A-D: A) The D71 chondrule: the accretion rim is compacted to fine grained aggregates containing microchondrules. The composition of aggregates and fine-grained material is similar. The interstitial area is filled by fine-grained material and troilite. B) D51 chondrule with clastic laminated accretion rim C). Enlarged image of the T-D51 chondrule accretion rim, where the fractures of olivine is filled by iron oxides. D) Clastic accretion rim of L-J71 chondrule containing microchondrules. The fractures are filled by iron oxides.

Helyenként a kompakció hatására létrejött, finomszemcsés rétegzett szerkezet jobban megőrződött (T-G11, L-G71, L-F31), esetenként ütközés hatására deformálódhatott (L-J71). Az ütközés hatására az akkréciós peremeket részben törmelékes zóna alkotja (L-D11, T-D51). Az akkréciós peremekben helyenként főleg mikrokondrumok (< 100 μm , T-D71, L-H51, L-F11, L-F31) és szilikát törmelékek (10 – 60 μm , L-H5, L-B41, L-F11, L-G71) fordulnak elő a finomszemcsés anyagban (2. táblázat, 3. ábra).



3. ábra E-F: E) A D11 kondrum törmelékes pereme kompaktációs aggregátumokkal, amit finomszemcsés, mikrokondrum-tartalmú zóna követ, F) kompozit akkréciós perem (övezetes, több héjből álló), prózus alapanyaggal, törmelékkel, amelyet durvaszemcsés rétegzett szerkezetű zóna követ.

Figure 3. E-F: E) Clastic rim of D11 chondrule with compacted aggregates, which is followed by fine-grained, microchondrule-bearing zone, F) composite accretion rim (multirimmed) with porous material, clasts, which is followed by coarse laminated structured zone.

2. táblázat: Akkréciós peremben előforduló szövetek kondrumok körül (T: „háromszög” nevű csiszolat – 13 db, L: „hosszú” nevű csiszolat – 4 db)

Table 2: Texture types in the accretional rim (T for the „triangle” (13), L for the „long” (4) named sample)

Kondrum neve	Akkréciós peremek vastagsága (min., max. μm)	Szerkezet	Mikrokondrumok száma
T-D51	50 –400	hullámos szerkezetű mikrokondrumok, törmelékes, nagyon finomszemcsés szerkezetek troilit- magnetit kitöltések a pórustérben	X (6)
L-D11	200–400	hullámos szerkezet, rétegzettség, kerek törmelékek összenyomódása, törmelékes olivin perem	X (3)
L-F11	30–80	hullámos szerkezet, rétegzettség	
T-D71	80–200	mikrokondrumok	X(6)
L-H32		mikrokondrumok	X (4)
L-J71	30–70	rétegzett szerkezetű mikrokondrumok, kerek törmelékek összenyomódása	X (3)
L-J51	10–30	mátrix aggregátumok, mikrokondrumok	X (3)
L-I21	30–100	mikrokondrumok	X (4)
L-H7	40–90	mikrokondrumok	X (4)
T-G41	30–100	rétegzettség, troilit-magnetit kitöltések a pórustérben	
T-J61	50–80	rétegzettség	
T-D41	80–100	troilit-magnetit kitöltések az üregekben	
L-H51	70–200	mikrokondrumok, rétegzett szerkezet, kerek törmelékek összenyomódása	X (8)

A kompakció a mátrixban is megfigyelhető, nemcsak a kondrumok körüli akkréciós peremekben. Fekete zárványok körül (finomszemcsés ásványokból és szerves anyagból álló halmazok) és CAI (Ca-Al-zárványok), illetve AOA (amőboid olivin halmazok) körül is előfordulnak. Az egyes ásvány-törmelékek körül (L-D6-1, L-K21) szintén hullámos (folyásos rétegzett) szerkezetet mutatkozik, esetenként kompakcióval (L-E6-1, L-E71).

A mikrokondrumok nemcsak az akkréciós perembe, hanem a mátrixba is beágyazódhatnak (L-F61, H2-1, T-G11, T-J62, T-J6-1, L-K4), és fekete zárványban is előfordulhatnak (T-J22). Kompakció hatására az akkréciós peremben kerek törmelékek alakulhatnak ki (J22), amelyek a mátrixban is előfordulhatnak (J2-1). A fenti megfigyelések alapján az akkréciós peremek kerek törmelékek összenyomódásával alakultak ki.

H51 kondrum akkréciós peremének jellemzése

A H51 akkréciós pereme mikrokondrumokat tartalmaz, (80–100 µm) amelyek szintén rendelkeznek saját akkréciós peremmel. Ezek a mikrokondrumok olivin és piroxén szemcséket tartalmaznak (20–30 µm), a szemcséközi térben vas-oxidos átalakulással. Az opak gömbök (2–5 µm) troilitből és szerves anyagból állnak, melyek eredetileg akkréciós peremet alkotó részecskék lehettek (fekete zárványok). A H51 kondrum akkréciós peremének a törmelékes zónája mechanikai ikres piroxént tartalmaz (50–60 µm). A H51 kondrum akkréciós peremének finomszemcsés része rétegzett szerkezetű vas-oxidokból áll, mikrokondrumokat tartalmaz (30–40 µm).

Infravörös mérések a H51 kondrumban

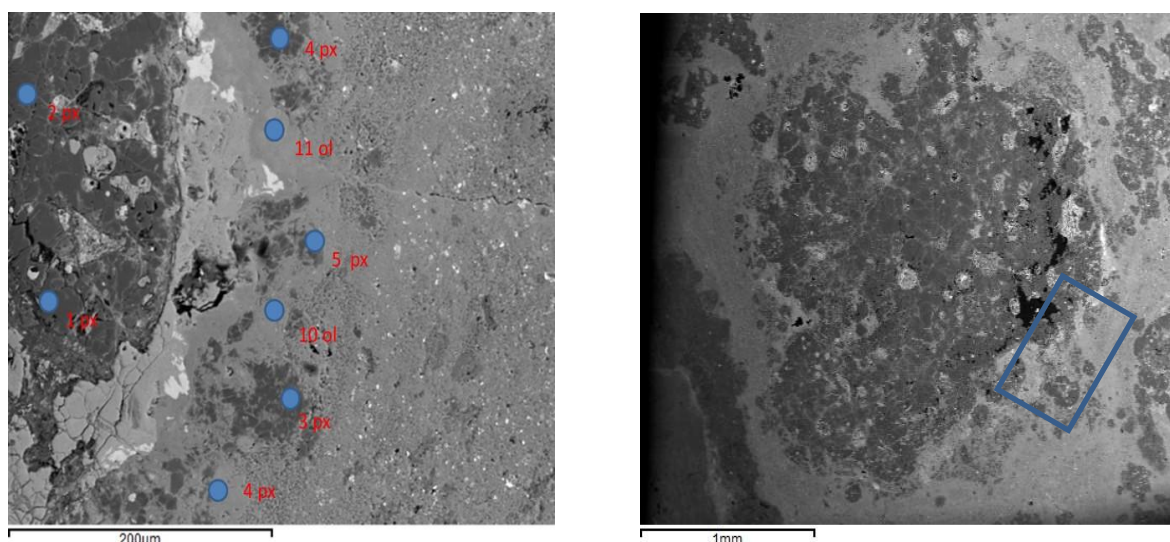
Az infravörös mérések során olivint és piroxént határoztunk meg (3. táblázat), ilyen szempontból a mátrix, mikrokondrumok és a belső kondrum hasonló összetételt mutatnak, így a keletkezési hőmérsékletben nagy különbségek nem mutathatók ki.

3. táblázat: H51 kondrum infravörös spektroszkópiai mérései az akkréciós perem szerkezete alapján és ásványos összetétele. Jelmagyarázat: Ol = olivin, Px = piroxén, Aug = augit, Di = diopszid, Fo = forsterit, Fa = fayalit, En = enstatit.

Table 3: Infrared measurements based mineral composition of the accretional rim of H51 chondrule. Legend Ol = olivine, Px = piroxene, Aug = augit, Di = diopside, Fo = forsterite, Fa = fayalite, En = enstatite.

Terület	Mérési pont	Ásványok
belső mátrix	E21, E22, F42, F52 D21	17db Ol, 2db Px
külső mátrix	E21, F42, E52, E62, E63, F51, F41, F23, F33, F34,	3db Px (Di), 2db Aug, 24db Ol,
törmelékek	D21, E62, F42, F51, F52 E53	6db (Ol) 2db (Fo) 4db (Fa) 7db (Aug) 2db (Di)
mikrokondrum:	F34, F41, E21, E22, E24, E52, F33	Ol 9db, 4db Fo, Di 4db (2 db Ca-gazdag, 2db En
nagy kondrumban	D22, E52, F42, F52	2db Fo, 7db En, 2db Di

A mátrixban a méréseink alapján több az olivin (Ol) (3. táblázat), mint a kondrum belsejében, némelyik fayalit-os (Fa) összetételű. Az akkréciós héjban törmelékek többnyire piroxének voltak, melyek augit illetve diopszidos (Di) összetételhez sorolhatók.



4. ábra: BSE kép a H51 kondrumról mérési helyszínekkel (mérési helyek számokkal vannak jelölve, mellette az ásványok rövidítve: Px = piroxén, Ol = olivin).

Figure 4: BSE image of the H51 chondrule with measuring points (The measuring areas are marked by numbers, and minerals are added to measuring points: Px = pyroxene, Ol = olivine).

4. táblázat: Elemösszetétel a H51 kondrumban (mérési helyeken előforduló ásványok olivin és piroxén). Jelmagyarázat: Px = piroxén, Pig = pigeonit, En = ensztatit, Wo% = wollasztonit%, En% = ensztatit%, Fs% = ferroszilit%, Fo = forsterit, Fa = fayalit.

Table 4: Elemental composition of the H51 chondrule (mineral types at measuring points). Legend: Px= pyroxene, Pig=pigeonite, En=enstatite, Wo%= wollastonite%, En%=enstatite%, Fs%=ferrosilite%, Fo=forsterite, Fa=fayalite.

Zóna	Nagy kondrit széle		Akkrécións perem			[%]
fájlnév	35_01	35_02	35_03	35_04	35_05	
SiO ₂	55,96	58,96	53,48	60,12	56,12	
FeO _T	12,28	6,43	12,77	4,40	10,22	
MgO	28,62	34,61	28,16	34,69	31,39	
CaO	3,14	0,00	5,59	0,78	2,26	
Total	100,00	100,00	100,00	99,99	99,99	
Wo%	6,08	0,00	10,41	1,50	4,25	0–10%
En%	77,20	91,43	72,90	92,57	82,23	72–91%
Fs%	16,72	8,57	16,69	5,93	13,51	6–17%
Px típus	Pig	En	Pig	En	En	
olivin	Akkrécións perem					
fájlnév	35_09	35_10	35_11			
SiO ₂	35,85	36,62	33,59			
Fe O _T	50,12	49,64	58,48			
MgO	14,03	13,74	7,93			
Total	100,00	100,00	100,00			
Fo	35,68	35,42	21,17			21–35%
Fa	64,32	64,58	78,83			65–79%

A törmelékek helyzetétől függően fayalit (Fa) és forsterit (Fo) egyaránt előfordulnak, míg a finomszemcsés rész és a törmelékes olivinek az akkréciós peremben inkább fayalitos összetételűek. A kondrum belsejében a vas-oxidos repedések mentén és troilit közelében fordul elő fayalitos olivin.

A kondrum belseje és a mikorondrumok inkább forsterites összetételűek. A mikrokondrumok a normál olivintől a forsterites összetételig változnak, némelyek piroxénos, azok Ca, illetve Mg gazdag összetételt mutatnak, ami az elsődleges akkréciós folyamatokra jellemző. A nagy kondrum enzstatitból (En) diopszidból (Di), illetve forsteritből (Fo) áll, az olivin-piroxén összetételek pedig a mikrokondrumokéhoz közelítenek.

Összefoglalás

Az NWA10261 CV3 meteorit optikai, infravörös és elektromikroszondás elemzése alapján a kondrumok körüli akkréciós peremek és egy réteges „CAI (kalcium-alumínium-zárvány) szemcse mutatkozott. A H51 jelű kondrumban és az akkréciós perem kiválásakor az alábbi hőttörténet rekonstruálható:

- legkorábban az olivin (forsterit) vált ki 1400–1500 K-on;
- amit az enzstatit kiválása (1200–1350 K) követett;
- végül a pigeonit következett (935–845 K).

Az olivin vasas metasomatózisa – finomszemcsés ásványok keletkezése az akkréciós peremben 650 K-on történhetett.

A vizes átalakulás nyomai megfigyelhetők a kondrumok peremén és a repedés menti vas-oxidok gyakori előfordulása, valamint a CAI-k mentén az olivin és a spinell vasas átalakulása alapján. A fayalit és a pleonasztos spinell jelenléte a CAI peremek körül 800 K alatti forró vizes oldatok jelenlétére utal, míg a vas-oxidok alacsonyabb hőmérsékletű átalakulásra lehet következtetni (25–400 °C).

A kamacitok átalakulása több lépcsőben történt:

- oxidáció magas hőmérsékleten: magnetit;
- kénes oldatok hatására troilit képződése; majd
- vas-oxidok képződése (hematit, goethit) alacsony hőmérsékleten.

Köszönetnyilvánítás: A munka során a műszerhasználatot a GINOP 2.3.2-15-2016-00009, a meteoritokkal kapcsolatos általános háttérmunkát, a GINOP-2.3.2-15-2016-00003 projekt támogatta az NKFIH révén.

Hivatkozások

Bigolski, J.N., Weisberg, M.K., Ebel, D.S., Conolly Jr., H.C., 2014: Microchondrules; records of multiple heating events in the solar nebula and implications for the type II chondrule formation. 45th Lunar and Planetary Science Conference, #abs1879.

<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1879.pdf>

Bigolski, J.N., Weisberg, M.K., Connolly, H.C., Ebel, D.S., 2016: Microchondrules in three unequilibrated ordinary chondrites. Meteoritics & Planetary Science, 51(2): 235–260.

<https://doi.org/10.1111/maps.12585>

- Blander, M., Fuchs, L.H., 1975: Ca-Al-rich inclusions in the Allende meteorite: evidence for a liquid origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(12): 1605–1619. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90083-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90083-6)
- Brearley, A.J., Krot, A.N., 2012: Metasomatism in the early solar system: The record from chondritic meteorites. In *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock – Lecture Notes in Earth System Sciences*, 659–789. Print ISBN: 978-3-642-28393-2, Electronic ISBN: 978-3-642-28394-9 https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_15
- Dobrică, E., Brearley, A.J., 2016: Microchondrules in two unequilibrated ordinary chondrites: Evidence for formation by splattering from chondrules during stochastic collisions in the solar nebula. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(5): 884–905. <https://doi.org/10.1111/maps.12633>
- Grossman, L., 1975: Petrography and mineral chemistry of Ca-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(4): 433–454. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90099-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90099-X)
- Hewins, R.H., Jones, R.H., Scott, E.R.D., 1996: Chondrules and the Protoplanetary Disk. Cambridge University Press, 157p. ISBN 0521552885
- Hua, X., Zinner, E.K., Buseck, P.R., 1996: Petrography and chemistry of fine-grained dark rims in the Mokoia CV3 chondrite: Evidence for an accretionary origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4265–4274. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00226-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00226-8)
- Hutchison, R., Alexander, C.M.O., 1987: The Semarkona meteorite: First recorded occurrence of smectite in an ordinary chondrite, and its implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(7): 1875–1882. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90178-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90178-5)
- Jacquet, E., Alard, O., Gounelle, M., 2015: Trace element geochemistry of ordinary chondrite chondrules: The type I/type II chondrule dichotomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 155: 47–67. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.02.005>
- Kawasaki, N., Sakamoto, N., Hisayoshi Yurimoto, H., 2012: Oxygen isotopic and chemical zoning of melilite crystals in a type A Ca-Al-rich inclusion of Efremovka CV3 chondrite. *Meteoritics and Planetary Science*, 47(12): 2084–2093. <https://doi.org/10.1111/maps.12033>
- Kimura, M., Chen, M., Yoshida, Y., El Goresy, A., Ohtani, E., 2003: Back transformation of high pressure phases in a shockmelt vein of an H-chondrite during atmosphere passage: Implications for the survival of high-pressure phases after decompression. *Earth and Planetary Science Letters*, 217: 141–150. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00585-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00585-5)
- King, T.V.V., King, E.A., 1981: Accretionary and dark rims in equilibrated chondrites. *Icarus*, 48: 460–472. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(81\)90056-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90056-7)
- MacPherson, G.J., Hashimoto, A., Grossman, L., 1985: Accretionary rims on inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 2267–2279. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90227-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90227-3)
- Metzler, K., Bischoff, A., Stöffler, D., 1992: Accretionary dust mantles in CM chondrites: Evidence for solar nebula processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 2873–2897. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90365-P](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90365-P)
- Ormel, C.W., Cuzzi, J.N., Tielens, A.G.G.M., 2008: Co-accretion of chondrules and dust in the solar nebula. *The Astrophysical Journal*, 679(2): 1588. <https://doi.org/10.1086/587836>
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/587836/pdf>


Internetes hivatkozások:

[1 – Meteoritical Bulletin]:

<https://www.lpi.usra.edu/meteor/MetBullFindphoto.php?credit=Zsolt+Kereszty>

ORCID

Gyllai I.  <https://orcid.org/0000-0001-8576-0196>

Kereszturi Á.  <https://orcid.org/0000-0001-6420-510X>