

# Klasifikacija kamnitih meteoritov in hondrul – primer meteorita Jesenice

## Classification of stony meteorites and chondrules – the case of meteorite Jesenice

Bojan AMBROŽIČ<sup>1</sup>, Sašo ŠTURM<sup>2</sup>, Miha JERŠEK<sup>3</sup> & Breda MIRTIC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: bojan.ambrozic@siol.net

<sup>2</sup>Institut Jožef Stefan, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana

<sup>3</sup>Prirodoslovni muzej Slovenije, Prešernova 20, SI-1000 Ljubljana

Prejeto / Received 31. 5. 2012; Sprejeto / Accepted 29. 11. 2012

*Ključne besede:* kamniti meteoriti, meteorit Jesenice, hondrule, klasifikacija, mineralna sestava, kemična sestava

*Key words:* stony meteorites, meteorite Jesenice, chondrules, mineral composition, chemical composition, classification

### Izvleček

Predstavljen je izvor meteoritov s posebnim poudarkom na kamnitih meteoritih hondritih, katerih predstavnik je tudi meteorit Jesenice, ki je navadni L hondrit. Ker v hondritih hondrule predstavljajo večinski delež mase, so v drugem delu posebej predstavljene njihove morfološke, strukturne, petrološke, mineraloške in kemične značilnosti. Predstavljene so teorije o nastanku hondrul in ostalih struktur hondritov. Podan je sistematičen pregled načinov delitev meteoritov. Klasifikacije se med sabo razlikujejo v odvisnosti od značilnih geokemijskih parametrov in mineraloških lastnosti meteoritov. V članku so uporabljeni tudi nekateri novi slovenski strokovni izrazi, povezani z meteoriti in mineralnim materialom. Klasifikacija meteorita Jesenice je bila narejena na podlagi makroskopsko in mikroskopsko prepoznavnih značilnosti. Meteorit Jesenice smo razvrstili na podlagi stopnje udarne metamorfoze, stopnje preperelosti, petroloških značilnosti in kemijske sestave olivina. Ugotovili smo, da je meteorit Jesenice nediferenciran navadni hondrit z nizko vsebnostjo železa, ki je šibko udarno metamofoziran ter šibko preperel, kar je v skladu z razvrstitvijo, ki jo je opravili tudi Bischoff s sodelavci.

### Abstract

In the first part of the paper there is a description about genesis of meteorites, in particularly about stony meteorites – chondrites, since meteorite Jesenice is an ordinary L chondrite. Chondrules represent main part of the mass of chondritic meteorites. For this reason the second part of the paper talks about morphology, texture, mineralogy and chemical properties of chondrules. Main theories about chondrule formation and other distinctive textures found in chondrites are also presented. The paper also presents a review across different meteorite classifications. Meteorite classifications differ depending on the geochemical and mineralogical properties of meteorites. In this paper are also used some new Slovenian terms correlated with the science of meteorites and mineral materials. Classification of meteorite Jesenice is based on its macroscopic and microscopic characteristics. We classified meteorite Jesenice on the basis of shock metamorphosis, grade of weathering, petrological properties and chemical composition of olivine. We found out that meteorite Jesenice is weakly shocked weakly weathered undifferentiated low total iron ordinary chondrite. Our results are in agreement with findings of Bischoff and his colleagues.

### Uvod

Leta 2009 je na območje Mežakle padel meteorit (sl. 1), ki je dobil uradno ime meteorit Jesenice (SPURNÝ et al., 2010). Večino kosov meteorita danes hrani Prirodoslovni muzej Slovenije. Slovenski geologi smo tako dobili možnost preveriti in poglobiti znanje mineralogije tudi s proučevanjem tega meteorita. Pri tem se je pokazalo, da sta poleg poznavanja mineralogije meteoritov in njihove geneze pomanjkljiva tudi poznavanje metodologije karakterizacije meteoritov ter slovensko izrazoslovje, povezano z meteoriti.

Kot je bilo pričakovati, se je izkazalo, da se klasifikacije meteoritov spreminjajo ali dopolnjujejo, odvisno od njihovega avtorja. Pokazalo se je tudi, da avtorji za svojo klasifikacijo ne uporabljajo enakih parametrov oz. lastnosti meteoritov. Zato posamezne klasifikacije med seboj sploh niso primerljive. S časom pa se spreminjajo tudi zato, ker se metode preiskav razvijajo in še včeraj popolnoma neznana lastnost postane danes pomemben dejavnik, po katerem razlikujemo in klasificiramo meteorite.

Vendar pa je za prepoznavanje meteoritov potrebno najprej osnovno poznavanje procesov na-



Sl. 1. Meteorit Jesenice. Rumeno-rjave lise so sekundarni železovi minerali, ki so posledica oksidacije železovih mineralov. Črni sloj je žgalna skorja meteorita.

Fig. 1. Meteorite Jesenice. Brown-yellow rims are secondary iron minerals, which were formed by oxidation of iron minerals. Black layer is fusion crust.

stanka meteoritov. Tudi to poznavanje ne daje enega samega odgovora in zato v nadaljevanju podajamo najpomembnejša dognanja o njihovem nastanku, ki jih povzemamo po monografijah avtorjev Searsa (SEARS, 2004) in Nortona (NORTON, 2002).

V članku je predstavljen primer klasifikacije meteorita Jesenice na podlagi morfoloških in strukturnih značilnosti, ki so vidne in prepoznavne z optičnim mikroskopom v presevani svetlobi in z opazovanjem poliranega zbruska z odbitimi elektroni z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Preiskave so bile narejene na Oddelku za geologijo NTF UL in na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani.

### Nastanek in klasifikacija meteoritov

Sončev sistem, katerega del je tudi Zemlja, je nastal, ko se je gravitacijsko sesedel oblak medzvezdne mase plinaste in trdne snovi. Iz obeh skupaj je nato nastala Sončeva meglica. Velika večina te mase se je zaradi gravitacije koncentrirala v protozvezdo, drugi del trdne snovi v obliki prahu pa se je s plinasto maso združil v primitiven planetarni material – meglični sediment ali celo v večje telo – planetezimal. Zato imajo prvotna telesa meteoritov iz različnih območij v Sončevi meglici različno kemično sestavo in strukturo (SEARS, 2004). Meteoriti oz. pripadajoči meteoroidi imajo različna izvorna območja. Navadni hondriti so nastali v notranjem delu asteroidnega pasu, kjer so bili izpostavljeni višjim temperaturam in so izgubili večji del lahkih komponent. Ogljikovi hondriti pa vsebujejo več lahkih komponent, kar dokazuje, da so nastali v zunanjih predelih asteroidnega pasu (WASSON (1985 v SEARS, 2004), WEISBERG et al., 2006). Za CI ogljikov hondrit Orgueil obstaja celo sum, da je nastal izven asteroidnega pasu, v kometni orbiti (GOUNELLE et al., 2010). Asteroidni pas je predel osončja, ki ga omeujeta orbiti

Marsa in Jupitra. Asteroidi predstavljajo telesa, ki se med nastajanjem planetov niso združila v večje planete. Večina asteroidov v asteroidnem pasu je bila izpostavljena številnim medsebojnim trkom. Nekateri fragmenti teh asteroidov so se kasneje združili v nove asteroide, imenovane tudi kup gravitacijsko šibko vezanega drobirja (*angl. rubble pile*) (ATANACKOV et al., 2010). V osrednjem delu asteroidnega pasu so številni asteroidi zelo različnih dimenzij, na katerih je možno raziskovati različne stopnje gravitacijske diferenciacije in nastanek planetov.

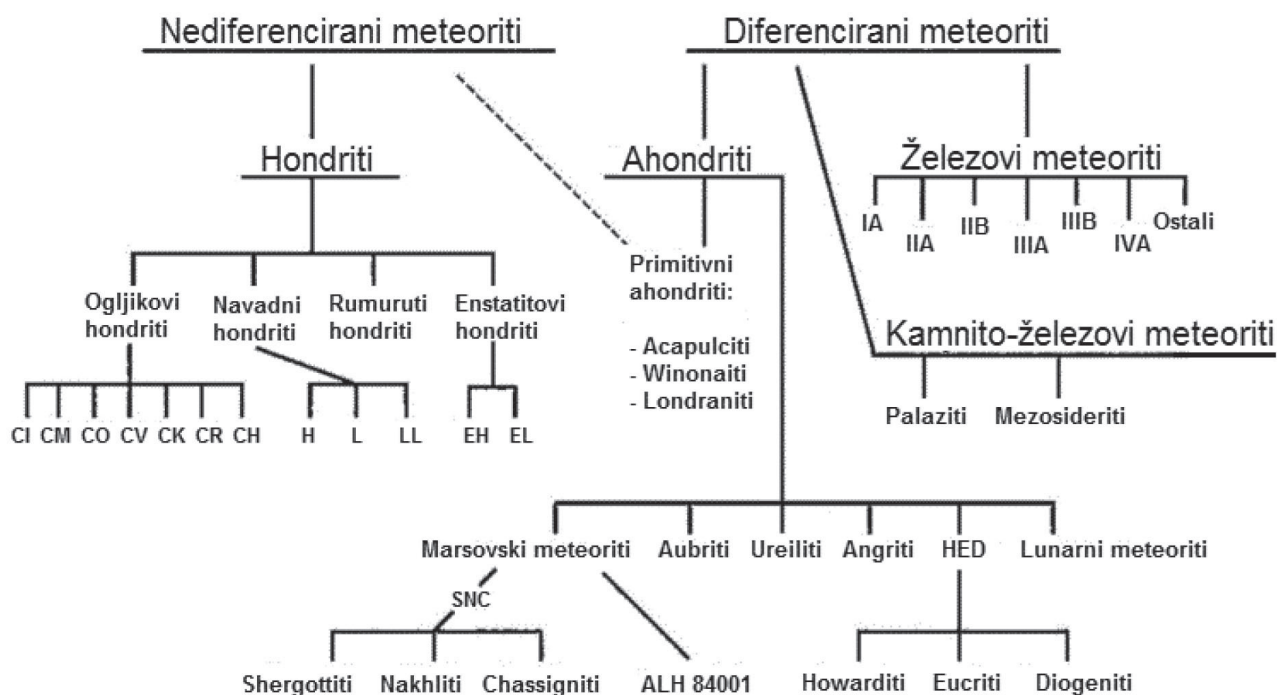
Meteoriti so v času svojega obstoja med potovanjem po vesolju izpostavljeni tudi zunanjim fizikalnim vplivom, katerih posledice se lahko v obliki strukturnih sprememb odražajo na telesu meteorita. Ena takih posledic je metamorfoza, ki jo je povzročil trk z drugim telesom. Druge pomembne spremembe se dogajajo, ko je meteorit izpostavljen spremenjenim pogojem temperature in tlaka atmosfere na površini Zemlje. Prej stabilni minerali, ki sestavljajo telo meteorita, se pričnejo spreminjati – preperevati. Preperevanje je značilnost procesov, ki jim je meteorit izpostavljen v prisotnosti kisika (Zemljina atmosfera) ter drugih fizikalnih in kemijskih procesov na Zemljskem površju. Oba pojava, tako udarna metamorfoza kot procesi preperevanja v atmosferskih razmerah, vplivajo na sestavo in strukturo meteorita, zaradi katerih meteorite še dodatno klasificiramo.

Pregled klasifikacij meteoritov je v svoji diplomski nalogi že naredila CURK (2009). Danes veljavna klasifikacija meteoritov sloni na razlikovanju znanih meteoritov glede na njihovo kemično in mineralno sestavo ter glede na izotopsko sestavo kisika (DAVIS, 2005).

Meteorite delimo glede na način nastanka iz matične trdne in plinaste snovi, iz katere so nastali in ki posledično vpliva na strukturo telesa meteorita, na nediferencirane in diferencirane (sl. 2).

Nediferencirani meteoriti so deli planetezimalov, ki v vsej svoji zgodovini niso bili nikoli izpostavljeni tako visoki temperaturi in tlaku, da bi se lahko vsaj delno stalili. Zaradi tega se njihova kemična sestava v splošnem ne razlikuje od sestave starševskega telesa oz. planetezimala. Nekaterne razlike v kemični sestavi so posledica nehomogenosti v masi starševskega telesa, Sončeve meglice, iz katere izhajajo ter v spremembah zaradi neravnotežnih pogojev med nastankom trdne snovi meteorita. Predstavniki nediferenciranih meteoritov so hondriti.

Diferencirani meteoriti so deli planetezimalov ali starševskih teles, ki so se zaradi svoje velikosti močno segreli, delno natalili in ponovno kristalili. Pri tem je prišlo do diferenciacije starševskega telesa meteorita v več slojev: npr. jedro, plašč in skorjo. Različni sloji starševskega telesa meteoritov se med seboj razlikujejo v kemični in mineraloški sestavi. Zato je sestava diferenciranih meteoritov tudi drugačna od sestave matične mase planetezimala in / ali Sončeve meglice. Med diferencirane meteorite spadajo tudi ahondriti.



Sl. 2. Klasifikacijska shema meteoritov (povzeto po INTERNET 2)

Fig. 2. Classification scheme of meteorites (adopted according to INTERNET 2)

Meteoriti se po sestavi delijo na kamnite, železove in kamnito-železove meteorite. Po podatkih iz spletne baze podatkov vseh doslej znanih meteoritov muzeja The Meteoritical Society (INTERNET 1) je kamnitih meteoritov (skupno padcev in najdb) daleč največ (95,6 %), medtem ko je železovih meteoritov 3,8 % in kamnito-železovih le 0,5 %. Za preostale najdbe (0,1 %) pa bodisi ni nedvoumno dokazano, da gre za prave meteorite, bodisi niso še klasificirane. Pregled železovih meteoritov sta predstavila že Miler in Gosarjeva (MILER & GOSAR, 2012), ko sta raziskovala železov meteorit iz Javorij (MILER & GOSAR, 2011), kratek pregled kamnitih meteoritov pa je naredila CURK (2009). Za posamezne razrede meteoritov (železove, hondrite, ahondrite) obstajajo podrobnejše klasifikacije. Kamnite meteorite lahko sestavljajo hondrule. Potem govorimo o hondritih. Če kamnit meteorit ne vsebuje hondrul, pa govorimo o ahondritih CURK (2009).

Nadalje se meteoriti delijo v posamezne skupine na osnovi značilnosti meteorita (sl. 2), po kateri se razlikuje od ostalih meteoritov (mineralna ali kemična sestava značilnega minerala, mesto najdbe, ime najditelja, ...). Po tej značilnosti se skupina tudi imenuje. Tako je npr. enstatitov hondrit ime skupine meteoritov glede na prevladujoč mineral enstatit. Nekateri meteoriti posamezne skupine pa se delijo še v podskupine. Te podskupine imajo lahko svoje ime ali samo oznako v obliki kratice (npr. H, L, LL, EH, CI, itd...). Npr. oznaka L pomeni, da gre za navadni hondrit z nizko vsebnostjo železa.

Prva značilnost meteoritov iz razreda hondritov, ki jo lahko opazimo s prostim očesom na površini meteorita, zagotovo pa na svežem prelomu, je pojav hondrul. Hondrule so makroskopsko pa tudi mikroskopsko vidnih dimenzij. Vidne so bile tudi na meteoritu Jesenice, zaradi česar smo

ga zlahka uvrstili med meteorite hondrite, ki spadajo med nediferencirane kamnite meteorite.

V večina meteoritov je bila v svoji dolgi zgodovini izpostavljena določeni stopnji udarne metamorfoze (SOKOL et al., 2005). Stöffler, Keil in Scott (1991) so meteorite glede na stopnjo metamorfoze razdelili v šest skupin. Stöffler-Keil-Scottova lestvica udarne metamorfoze (STÖFFLER et al., 1991 v NORTON, 2002) se opira na lastnosti olivina ter plagioklaza, ki so vidne z optičnim mikroskopom. Ker lestvica temelji na teh dveh mineralih, je primerna predvsem za določevanje stopnje udarne metamorfoze v navadnih hondritih. Lestvica je razdeljena na stopnje od S1 do S6 na podlagi napredujoče stopnje metamorfoze:

- S1 – nemetamorfozirani meteoriti: v zrnih olivina in plagioklaza se pojavljajo posamezne drobne nepravilne razpoke. Olivin pod presevnim mikroskopom ne kaže nobene valovite potemnitve. Meteorit je bil izpostavljen tlaku, ki ni presegal 5 GPa.
- S2 – zelo šibko metamorfozirani meteoriti: zrna olivina in plagioklaza kažejo valovito potemnitev. Zrna olivina so preprejena z nepravilnimi razpokami. Tlak je znašal 5-10 GPa.
- S3 – šibko metamorfozirani meteoriti: v olivinu so planarne ali udarne razpoke, ki so vzporedne s kristalografskimi ploskvami. Poleg tega olivin kaže izrazito valovito potemnitev. V tej stopnji glinenec ne kaže planarnih razpok. Prisotne so žile, zapolnjene z nepresevno talino. Tlak je znašal 15-20 GPa.
- S4 – srednje metamorfozirani meteoriti: v olivinu in plagioklazih so planarne razpoke. Poleg njih ima olivin mozaično teksturo. Plagioklaz (oligoklaz) začne prehajati v steklo maskelynit. Tlak je znašal 30-35 GPa.
- S5 – močno metamorfozirani meteoriti: oligoklaz popolnoma preide v steklo maskelynit z

identično kemično sestavo, kot jo imajo plagioklazi. Olivin ima izrazito mozaično teksturo. Meteorit postane prepreden z žepi in žilami, ki jih je zapolnila talina (LORCA et al., 2009). Tlak je znašal 45–55 GPa.

- S6 – zelo močno metamorfozirani meteoriti: olivin in piroksen rekristalizirata v trdno raztopino (JANOTS, 2011). Nekateri kristali olivina rekristalizirajo v ringwoodit. Maskelynit se spremeni v običajno steklo. Tlak je znašal 75–90 GPa.

Višja udarna metamorfoza kot pri stopnji S6, meteorit stali, uniči hondritno strukturo in ga spremeni v nov tip meteoritov, imenovan udarne breče (*angl. impact melt breccias*) (KEIL et al., 2008).

Z izrazom termična metamorfoza označujemo spremembe v mineralni sestavi in strukturi zunanjih delov telesa meteorita – skorje zaradi segrevanja telesa meteorita, ko le-ta potuje skozi Zemljino ozračje. Zaznamo jo kot taljenje posameznih mineralov in nastanek steklaste faze (LENART et al., 2010).

V primeru meteorita Jesenice, zrna kažejo valovito potemnitev ter vsebujejo planarne razpoke, kar je opazno z optičnim mikroskopom v presewni svetlobi. Oboje prestavlja dokaz za šibko stopnjo metamorfoze. Meteorit Jesenice je bil uvrščen v S3 stopnjo metamorfoze (BISCHOFF et al., 2011).

»Naravno« okolje meteoritov je skorajda popoln vakuum vesolja. Oksidacijske razmere v Zemljini atmosferi pa povzročajo zelo hitro kemično preperavanje meteoritov (SOKOL et al., 2005). WLOTZKA (1993) je meteorite razdelil glede na napredujočo stopnjo preperavanja v 7 razredov od nepreperelih (W0) do popolnoma preperelih (W6):

- W0: oksidacija s prostim očesom ni opazna. V presewni svetlobi pod optičnim mikroskopom opazimo rumeno-rjavkasto limonitno obarvanje.
- W1: v manjši meri se okoli kovinskih mineralov pojavljajo oksidacijski robovi. V posameznih žilah in razpokah je opazna oksidacija.
- W2: napredujoča oksidacija kovinskih mineralov prizadene 20–60 % kovinskih zrn.
- W3: 60–95 % kovinskih mineralov in troilita je nadomeščenih s sekundarnimi železovimi minerali.
- W4: popolna (več kot 95 %) oksidacija kovinskih mineralov in troilita. Spremembe v silikatih še niso prisotne.
- W5: olivin in piroksen sta deloma spremenjena predvsem vzdolž razpok.
- W6: silikatni minerali so močno spremenjeni in nadomeščeni z glinenimi minerali ter oksidi.

V primeru meteorita Jesenice na prelomni površini meteorita, ki je nastala, ko je meteorit udaril ob tla in razpadel na več manjših kosov, lahko že s prostim očesom vidimo oksidacijski rob okrog zrn kovinskih mineralov. Nastal je kot posledica oksidacije teh mineralov v podnebnih razmerah na Mežakli. Glede na velikost oksidacijskega roba je meteorit Jesenice uvrščen na lestvici preperelosti v stopnjo W0 do W1 (sl. 1).

## Nastanek in klasifikacija hondritov

Kamniti meteoriti hondriti so dobili ime po hondrulah, ki v njih prevladujejo. Starost hondritov je bila določena z absolutnimi datacijami z radioaktivnimi izotopi Sr, Pb in Nd na povprečno 4.56 milijarde let, kar ustreza starosti Zemlje in astrofizikalnim ocenam starosti Sonca (SEARS, 2004). Hondriti naj bi nastali s procesi akrecije (SOKOL et al., 2007), aglomeracije, brečizacije in končnega oblikovanja (*angl. final assembly*) (SEARS, 2004). Proces akrecije naj bi obsegali bodisi zgoščevanje (nebularnega) prahu Sončeve meglice v planetezimale, bodisi zbiranje tega prahu na površini planetezimalov. V procesu aglomeracije naj bi nebularni prah predstavljal osnovo za nastanek kamnine na površini planetezimalov. Brečizacija je posledica udarne sile (trk z drugim telesom), zaradi katere je planetezimal razpadel. Nastali fragmenti so se kasneje ponovno združili v brečasta telesa. Končno oblikovanje pa pomeni združitev materiala v meteoroidne in asteroidne, kot jih vidimo danes.

Meteoriti iz razreda hondritov se v osnovi delijo v več različnih skupin hondritov. Med temi je za skupino ogljikovih hondritov značilno, da so tekom svoje zgodovine prestali določeno metamorfozo, povezano z vodo (NORTON, 2002). Meteoriti iz skupine navadnih hondritov ter ogljikovi hondriti iz podskupin CV, CO in CH, pa so bili izpostavljeni določeni stopnji termične metamorfoze (SEPP et al., 2001). Pri hondritih petrološkega tipa 3 je ta potekala pri temperaturi pod 600 °C, pri petrološkem tipu 4 pri 600–700 °C, pri petrološkem tipu 5 pri 700–750 °C in pri petrološkem tipu 6 pri 750–950 °C (SEARS, 2009).

Z metodo Ar-Ar so raziskovalci ugotovili, da je bila večina meteoritov izpostavljena kozmičnemu sevanju vesolja le nekaj milijonov let. To pomeni, da so bili meteoriti prej del večjih teles oz. asteroidov, ki so kasneje razpadli. Večina H hondritov je bila izpostavljena kozmičnemu sevanju okoli 8 milijonov let, večina LL hondritov 17 milijonov let, L hondriti pa ne kažejo zelo izrazitega vrha pri času izpostavljenosti kozmičnemu sevanju (SEARS, 2004). Vendar se veliko znanstvenikov strinja, da pri L hondritih vseeno obstaja dokaj dobro definiran vrh izpostavljenosti kozmičnemu sevanju, datiran na starost približno 470 milijonov let, kar ustreza srednjemu ordoviciju. V morskih sedimentih srednje ordovicijske starosti so našli stokrat več fosilnih L hondritov od povprečja. To nakazuje da je bila Zemlja takrat intenzivno bombardirana z L hondriti. Starševsko telo L hondritov je najverjetneje asteroid 8 Flora, ki je le eden izmed cele (istoimenske) družine asteroidov, ki je nastala z razpadom starševskega telesa pred 470 milijoni let (NESVORNÝ et al., 2007, 2009).

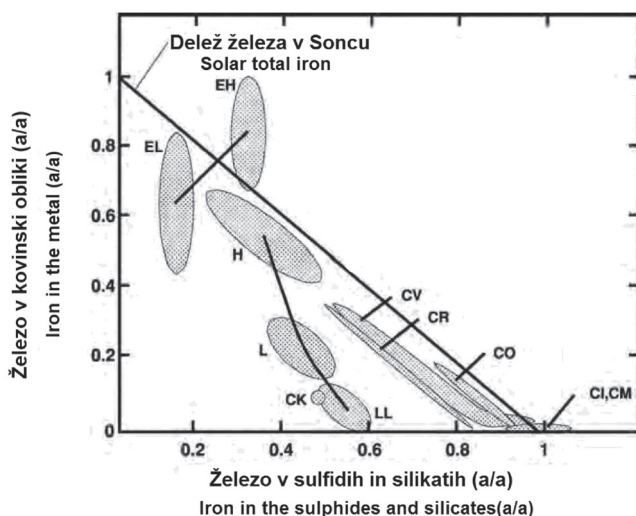
Prvo klasifikacijo hondritov je vpeljal PRIOR (1916). Po njej se meteoriti delijo na osnovi kemijskih lastnosti, ki sledijo t.i. Priorjevemu zakonu. Priorjev zakon pravi, da več ko je železa v meteoritu v oksidni obliki v silikatnih mineralih (kot sta olivin in piroksen), manj ga bo v meteoritu v kovinskih mineralih.

Hondritni meteoriti so po tej klasifikaciji razdeljeni na skupine na podlagi razmerja med količino železa v elementarni obliki ter železa v oksidni / sulfidni obliki (sl. 3). Poleg olivina je Prior v imenu uporabil ime najpogostejšega ortopiroksena, ki se pojavlja v meteoritu. Na podlagi tega je hondrite razdelil na enstatitove, olivinovo-broncitove, olivinovo-hiperstenove, olivinovo-pigeonitove in ogljikove hondrite. Danes ta klasifikacija ni več v uporabi, ker obstajajo podrobnejše klasifikacije, ki jih je omogočil razvoj elektronske mikroanalize. Na tem mestu pa jih omenjamo, ker se te klasifikacije pojavljajo v starejši literaturi. Vendar se meteoriti še vedno delijo glede na skupino na navadne, enstatitove, ogljikove in rumuruti hondrite.

Avtorja druge klasifikacije sta UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004), ki sta hondrite razdelila na osnovi razmerja med vsebnostjo železa v kovinah in vsebnostjo železa v sulfidih in silikatih, razmerja med kalcijem in silicijem ter razmerja med elementarnim železom + železom v sulfidni obliki in železom v oksidni obliki. V vseh primerih so se merjena razmerja nanizala okrog treh različnih vrednosti, ki ustrezajo trem osnovnim skupinami hondritov – enstatitovim hondritom (E hondritom), navadnim hondritom (OC hondritom) ter ogljikovim hondritom (C hondritom).

Po danes veljavni klasifikaciji (NORTON, 2002) navadne hondrite klasificiramo na podlagi razmerja  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  v olivinu in piroksenu. Sestava olivina je običajno podana v obliki molskega deleža fayalita. Meteoriti imajo povprečno sestavo med 15 in 30 mol.% fayalita. V primeru piroksena pa se sestava zapiše v obliki molskega deleža ortopiroksena ferosilita.

Na podlagi teh lastnosti navadne hondrite klasificiramo v tri podskupine. Prvi so H hondriti ali meteoriti z visoko vsebnostjo železa. Ti hondriti imajo največ železa tako v kovinskih mineralih (15-19 mas.%), kot tudi skupno (25-30 mas.%).



Sl. 3. Klasifikacija hondritov glede na razmerje med vsebnostjo železa v kovinah in vsebnostjo železa v sulfidih in silikatih (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 3. Diagram plotting the amount of iron in the metal against the amount of iron in the oxide and sulfide forms (adopted according to SEARS, 2004)

Vendar olivin in piroksen vsebujeta relativno malo železa ( $\text{Fa}_{15-20}$  mol.% in  $\text{Fs}_{14-20}$  mol.%) (neposredna posledica Priorjevega zakona). H hondriti so najpogostejši meteoriti med vsemi podskupinami in vsemi razredi meteoritov. Po kemični sestavi piroksena ustrezajo sestavi broncita. Druga podskupina so L hondriti ali meteoriti z nizko vsebnostjo železa. Gre za drugo najpogostejšo podskupino meteoritov. Za L hondrite je značilno, da vsebujejo 1-10 mas.% železa v kovinskih mineralih in skupno 20-23 mas.% železa. Ti meteoriti imajo z železom že bolj bogat olivin ( $\text{Fa}_{21-25}$  mol%) ter prav tako ferosilit ( $\text{Fs}_{20-30}$  mol%). Tretja in najredkejša podskupina navadnih hondritov so t.i. LL hondriti ali hondriti z zelo nizko vsebnostjo železa. Ti hondriti vsebujejo v povprečju le še 1-3 mas.% železa v kovinskih mineralih. Skupno pa vsebujejo 19-22 mas.% železa. Imajo pa ti hondriti z železom najbolj obogatena minerala olivin ( $\text{Fa}_{26-32}$  mol%) ter ferosilit ( $\text{Fs}_{32-40}$  mol%).

Olivin v meteoritu Jesenice je sestave  $\text{Fa}_{25.1 \pm 0.4}$  in  $\text{Fa}_{21.1 \pm 0.4}$ . Zato so Bischoff in sodelavci (BISCHOFF et al., 2011) meteorit Jesenice glede na kemično sestavo uvrstili v skupino navadnih hondritov in v podskupino L hondritov.

Poleg navadnih hondritov med hondrite sodijo tudi enstatitovi hondriti (E), ogljikovi hondriti (C) in rumuruti hondriti (R). Za vse te skupine meteoritov je značilno, da so njihovi predstavniki precej redki (NORTON, 2002, HORSTMANN et al., 2010). Enstatitove hondrite imenujemo po magnezijevem silikatu, ki zavzema 60-80 vol.% hondritov. Za enstatitove hondrite je značilno, da je praktično vse železo prisotno v elementarni ali sulfidni obliki. V oksidni obliki je železa v olivinu manj kot en molski odstotek. Zato se v enstatitovih hondritih pojavlja presežek kremenice, ki kristali kot kristobalit in tridimit. Enstatitovi hondriti so edina vrsta meteoritov, v katerih se pojavlja kremen oz. njegove modifikacije. Dodatno se od navadnih hondritov ločijo po nizkem razmerju med magnezijem in silicijem. Enstatitovi hondriti so (podobno kot navadni hondriti) razdeljeni na podlagi skupne količine železa na enstatitove hondrite z visoko vsebnostjo železa (EH) in enstatitove hondrite z nizko vsebnostjo železa (EL). EH hondriti vsebujejo 30 mas.% železa, EL hondriti pa 25 mas.% železa. Ogljikovi hondriti so redka skupina kamnitih meteoritov, ki na površju Zemlje, izpostavljeni preperevanju in zaradi poroznosti, zelo hitro razpadejo. Za njih je značilno, da vsebujejo precejšnje količine kemično vezane vode (< 22 mas.%), medtem ko navadni hondriti vsebujejo manj kot 1 mas.% vode. Prav tako vsebujejo ogljikovi hondriti bistveno več lahko hlapnih komponent kot navadni hondriti. V ogljikovih hondritih so našli številne organske spojine (NORTON, 2002). Domnevajo, da so ogljikovi hondriti ena prvih trdnih snovi, ki so nastale v našem osončju. Ogljikovi hondriti so v času svoje zgodovine prišli v stik z vodo in doživeli t. i. spremembo v reakciji z vodo (angl. *aqueous alteration*). Zaradi te spremembe so vsi ogljikovi hondriti razvrščeni v petrološke tipe 1-4. V ogljikovih hondritih so tudi kalcijevo-aluminijevi

vklučki (CAI), ki jih v drugih vrstah meteoritov ne najdemo. Sestavljajo jih minerali oksidi, kot sta spinel in perovskit ter silikati, kot sta npr. klinopiroksen in anortit. Predstavljali naj bi prvo trdno snov v osončju. Ogljikovi hondriti se delijo na 7 podskupin: CK, CV, CO, CH, CR, CM in CI hondrite. Posebnost so CI hondriti, za katere je značilno, da imajo hondritno strukturo, a ne vsebujejo hondrul. Rumuruti hondriti so najnovejša skupina hondritov. Predstavljajo eno redkejših vrst meteoritov, saj v bazi podatkov vseh znanih meteoritov najdemo zapise o le 129 primerkih (INTERNET 1). Za njih je značilno, da skorajda ne vsebujejo železa v elementarni obliki, kar je ravno nasprotno kot pri enstatitovih hondritih. Večino volumna zavzemajo silikati, med katerimi prevladuje olivin (70 vol.%) sestave  $Fe_{38-41}$ . Poleg olivina pa nastopa še plagioklaz (14 vol.%) in s Ca bogat piroksen (5 vol.%).

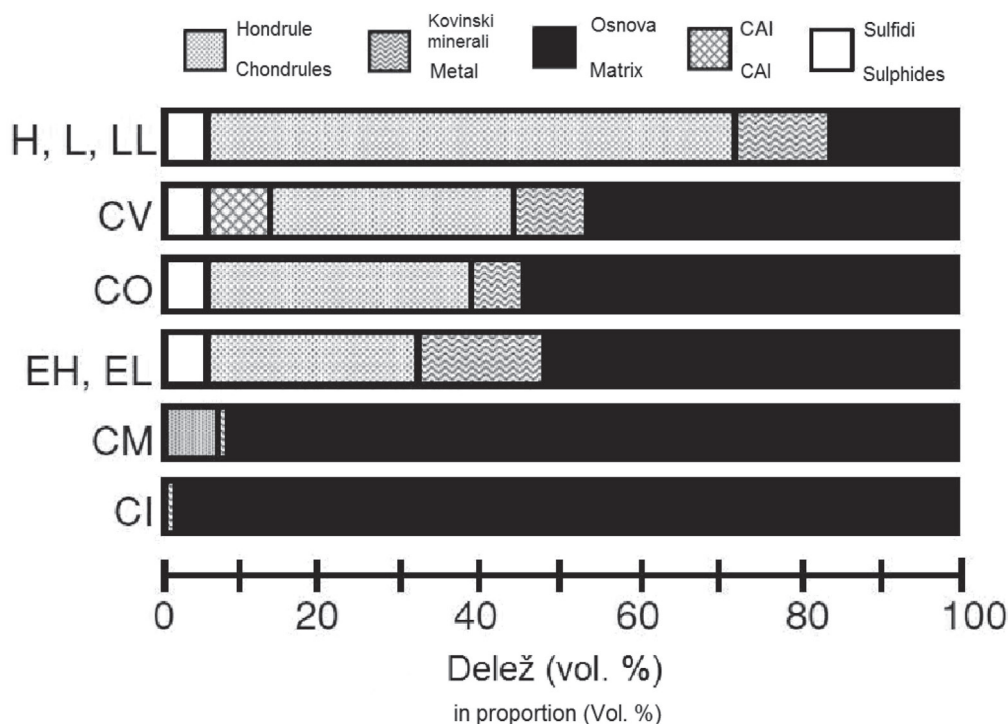
Meteoriti hondriti se med seboj razlikujejo tudi po zgradbi oz. v razmerjih med povprečnim volumnom hondrul, kovinskih mineralov, sulfidov in CAI vključkov (SEARS, 2004) (sl. 4). Navadni hondriti v povprečju vsebujejo največ hondrul (65-75 vol.%), medtem ko enstatitovi hondriti vsebujejo v povprečju 20-40 vol.% hondrul. Vsebnost hondrul v ogljikovih hondritih se močno spreminja. CH hondriti vsebujejo okoli 70 vol.% hondrul, medtem ko CI hondriti sploh ne vsebujejo hondrul. Največ kovinskih mineralov vsebujejo enstatitovi hondriti (18-22 vol.%). V navadnih hondritih pa je kovinskih mineralov od 2 do 16 vol%. Ogljikovi hondriti se glede na vsebnost kovin zelo močno razlikujejo. V povprečju vsebujejo okoli 5 vol.% kovin. Osnova sestavlja 10-15 % prostornine navadnih hondritov in več kot 50 % prostornine enstatitovih hondritov. Ogljikovi hondriti se po vsebnosti osnove zelo razlikujejo. Največ (> 98 vol.%) je vsebujejo CI hondriti, najmanj (5 vol.%) pa CH hondriti. Razporeditev sulfi-

dov je v hondritih relativno enakomerna. Navadni hondriti, enstatitovi hondriti ter celo nekateri ogljikovi hondriti vsebujejo okoli 7 vol.% sulfidnih mineralov. Kalcijevo-aluminijski vključki – CAI (GRESHAKE et al., 1997) so posebnost, ki se pojavlja izključno v CV in CO ogljikovih hondritih. V CV hondritih CAI vključki zavzemajo do 10 % prostornine.

Srednji premer hondrul je naslednja značilnost, po kateri hondrite razlikujemo med seboj. Povprečna velikost hondrul v navadnih hondritih znaša 450  $\mu$ m in nekoliko variira med posameznimi podtipi. V H-hondritih je povprečni premer hondrul 300  $\mu$ m (SOKOL et al., 2005), v L-hondritih 500  $\mu$ m in v LL-hondritih 650  $\mu$ m. Pri enstatitovih hondritih znaša premer hondrul podtipa EH 220  $\mu$ m in 550  $\mu$ m v podtipu EL. Pri ogljikovih hondritih pa premer hondrul variira med 150 in 1000  $\mu$ m (NORTON, 2002). Podtip CV ima hondrule največjega premera (1000  $\mu$ m), kateremu sledijo podtipi CK (800  $\mu$ m), CR (700  $\mu$ m), CM (270  $\mu$ m) in CO (150  $\mu$ m). CI hondriti ne vsebujejo hondrul. R hondriti pa imajo povprečen premer hondrul 400  $\mu$ m (NORTON, 2002).

Navadni hondriti se med seboj jasno ločijo tudi na podlagi velikosti (premera) zrn kovinskih mineralov. Poleg tega obstaja še povezava med velikostjo zrn kovinskih mineralov in velikostjo hondrul. Pri navadnih hondritih velja pravilo, da večje kot so hondrule v meteoritu, manjša bo povprečna velikost zrn kovinskih mineralov. Tako imajo H hondriti, ki sicer vsebujejo najmanjše hondrule, največja zrna kovinskih mineralov (190-210  $\mu$ m), sledijo L hondriti (160-200  $\mu$ m) in LL hondriti (120-160  $\mu$ m) (SEARS, 2004).

William Randall Van Schmus in John A. Wood sta leta 1967 razvila Van Schmus-Woodovo petrokemijsko klasifikacijo hondritov (VAN SCHMUS et al., 1967 v NORTON, 2002). Opazila sta, da se hondriti z enako kemijsko sestavo še vedno pre-



Sl. 4. Povprečna sestava različnih vrst hondritov (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 4. Average composition of different types of chondrites (adopted according to SEARS, 2004)

cej razlikujejo že, če jih opazujemo z optičnim mikroskopom (NORTON, 2002). Poleg tega njuna klasifikacija omogoča osnovno, a vseeno dokaj dobro določitev vrste meteorita že zgolj z uporabo optičnega mikroskopa. Klasifikacija, ki sta jo vpeljala, obsega 10 različnih kriterijev (tabela 1), na podlagi katerih meteorite razvrščamo v 6 (oz. 7) petroloških tipov. Petrološke oznake meteorita se dodajajo za kemijskimi oznakami (npr. L6 hondrit). Petrološki tipi od 1-3 pomenijo, da je bil hondrit v geološki zgodovini izpostavljen vodi oz. je reagiral z njo. Nižji petrološki tip po-

meni, da je bila sprememba hondrita bolj izrazita zaradi reakcije z vodo. V petrološke tipe med 1 in 3 sodijo vsi ogljikovi hondriti. Petrološki tipi od 4 do 6 pa pomenijo, da je bil meteorit tekom svoje zgodovine izpostavljen termični metamorfozi. Višji, kot je petrološki tip, pri višji temperaturi je potekala ta metamorfoza. V strukturi hondritov se izraža predvsem v tem, kako dobro so hondrule ohranjene in definirane. Pri hondritih petroloških tipov 3 in 4 so hondrule zelo dobro ohranjene. Pri višjih petroloških tipih pa hondrule postajajo vse manj razpoznavne in vse

Preglednica 1. Kriteriji za razvrščanje meteoritov v petrološke tipe (povzeto po LAURETTA et al., 2006)

Tip	1	2	3	4	5	6	7
<b>Kriterij</b>							
<b>Homogenost sestave olivina</b>	–	> 5 % stadnardna deviacija		≤ 5 %	Homogen		
<b>Simetrijski razred piroksena z nizko vsebnostjo Ca</b>	–	Večinoma monoklinski		>20 % monoklin.	≤ 20 % monoklinski	Ortorombski	
<b>Glinenec</b>	–	Primarna zrna		Sekundarna <2 μm zrna	Sekundarna 2-50 μm zrna	Sekundarna >50 μm zrna	
<b>Steklo v hondrulah</b>	Spremenjeno ali odsotno	Večinoma spremenjeno	Čisto, izotropno	Devitrifici-rano	Odsotno		
<b>Kovinski minerali: maks. Ni (mas. %)</b>	–	<20 % taenit	>20 % kamacita in taenita v obliki trdne raztopine				
<b>Sulfidi: srednja Ni (mas. %)</b>	–	>0.5 %	<0.5 %				
<b>Osnova</b>	Drobnozrnata, nepresevna	Večinoma drobnozrnata, nepresevna	Nepresevna do prozorna	Prozorna, rekristalizirana			
<b>Izoblikovanost hondrul</b>	Brez hondrul	Hondrule imajo jasno vidne meje		Nekatere hondrule so zdrobljene, redke z jasno vidnimi mejami		Hondrule so večinoma zdrobljene	Primarne teksture so uničene
<b>Ogljik (mas. %)</b>	3-5 %	0.8-2.6%	0.2-1 %	<0.2 %			
<b>Voda (mas. %)</b>	18-22 %	2-16 %	0.3-3 %	<1.5 %			

Table 1. Criteria for classification of meteorites in petrologic types (adopted according to LAURETTA et al., 2006)

Type	1	2	3	4	5	6	7
<b>Criterion</b>							
<b>Homogeneity of olivine compositions</b>	–	> 5 % mean deviations		≤ 5 %	Homogenous		
<b>Structural state of low-Ca pyroxene</b>	–	Predominantly monoclinic		>20 % monoclinic	≤ 20 % monoclinic	Orthorombic	
<b>Feldspar</b>	–	Minor primary grains		Secondary <2 μm grains	Secondary 2-50 μm grains	Secondary >50 μm grains	
<b>Chondrule glass</b>	Altered or absent	Mostly altered, some preserved	Clear, isotropic	Devitrified	Absent		
<b>Metal: Maxium: Ni (wt %)</b>	–	<20 % taenite minor or absent	>20 % kamacite and taenite in exsolution relationship				
<b>Sulfide: Mean Ni (wt %)</b>	–	>0.5 %	<0.5 %				
<b>Matrix</b>	Finegrained, opaque	Mostly fine-grained opaque	Opaque to transparent	Transparent, recrystallized			
<b>Chondrule-matrix integration</b>	No chondrules	Sharp chondrule boundaries		Some chondrules can be discerned, fewer sharp edges		Chondrules poorly delineated	Primary textures destroyed
<b>Carbon (wt %)</b>	3-5 %	0.8-2.6%	0.2-1 %	<0.2 %			
<b>Water (wt %)</b>	18-22 %	2-16 %	0.3-3 %	<1.5 %			

bolj rekristalizirane. Robove oz. meje hondrul je vse težje določiti. Pri hondritih petrološkega tipa 6 so dobro definirane večinoma le večje hondrule, ker so le te bolj odporne na termično metamorfozo. Petrološki tip 7 pa označuje strukturo, kjer so hondrule povsem uničene. Do danes je znanih le nekaj 10 meteoritov, ki sodijo v petrološki tip 7. Nekateri te meteorite razumejo kot vmesni člen med hondriti in primitivnimi ahondriti. Termična metamorfoza poteka pri temperaturah med 400 in 950 °C, pri čemer vse kemijske reakcije potekajo izključno v trdnem stanju. Omogočena je bila le migracija določenih elementov ter rast novih mineralov. Termična metamorfoza je imela vpliv tudi na osnovo hondritov, ki pri hondritih višjih petroloških tipov vsebuje vse manj steklaste faze. Zaradi teh učinkov termične metamorfoze so meteoriti višjih petroloških tipov bolj homogeni po kemični sestavi kot meteoriti nižjih tipov. Zato hondrite petroloških tipov 1-4 imenujemo neuravnoteženi hondriti (angl. *unequilibrated chondrites*), tiste petroloških tipov 5-6, pa uravnoteženi hondriti (angl. *equilibrated chondrites*) (NORTON, 2002).

V meteoritu Jesenice so s prostim očesom vidne samo redke velike hondrule. Tudi v zbrusku so pod optičnim mikroskopom le tu in tam hondrule vidne v svoji značilni okroglasti obliki, kljub temu, da naj bi maso meteorita hondrita v veliki večini sestavljale samo večje ali manjše hondrule. V primeru meteorita Jesenice je večina hondrul razpadla v sestavne dele nepravilnih oblik. Med temi poligonalnimi kosi plavajo posamezne pravilno oblikovane hondrule. Naše ugotovitve potrjujejo uvrstitev meteorita Jesenice v petrološki tip 6 (sl. 5), za katerega je značilna srednja stopnja rekristalizacije zaradi termične metamorfoze (po Van Schmus-Woodovi petrokemijski klasifikaciji). Pri tej stopnji metamorfoze je že prišlo do homogenizacije kemične sestave v masi meteorita, zaradi česar spada meteorit Jesenice med homogene hondrite (NORTON, 2002).

### Nastanek hondrul

Hondrule so sferične do subsferične strukture v hondritih, za katere je značilno, da so bile nekoč v preteklosti popolnoma ali vsaj deloma staljene. Ker večino mase hondritov sestavljajo hondrule, je naslednje poglavje namenjeno razlagi njihovega pojavljanja. Teorije nastanka hondrul so povezane po Searsu (SEARS, 2004), ki je zbral posamezne teorije več kot šestdesetih avtorjev, kar kaže na to, da je o nastanku hondrul še veliko nerešenih vprašanj. V nadaljevanju so predstavljene najbolj aktualne teorije, ki so poimenovane kar po njihovih avtorjih. Glede na podobnost med teorijami nastanka hondrul lahko večino teorij združimo v dve glavni skupini. Prva skupina teorij zagovarja nastanek hondrul iz prvotne solarne meglice. Druga teorija pa razlaga nastanek hondrul s procesi na starševskih telesih meteoritov.

Teorije nastanka hondrul v meglici lahko v grobem razdelimo na teorije, ki razlagajo nastanek

hondrul s Sončevo aktivnostjo in teorije, ki trdijo, da so hondrule nastale neposredno s kondenzacijo iz meglice. Nastanek hondrul kot posledica Sončeve aktivnosti zahteva, da so se starševska telesa meteoritov nahajala v bližini Sonca. Protuberance, koronarni izbruhi in druge površinske Sončeve aktivnosti pa naj bi neposredno vplivale na starševska telesa hondritov. Zaradi Sončeve aktivnosti naj bi bil material iz starševskih teles iztrgan in odnesen iz notranjega v zunanje predele osončja. SORBY (1877 v SEARS, 2004) in BOSS in sod. (1993 v SEARS, 2004) menijo, da starševsko telo sploh »ni bilo potrebno«, ampak so hondrule neposreden kondenzat Sončevega izvrženega materiala. V to skupino teorij sodi tudi teorija Shuja, ki trdi, da so hondrule nastale ob nastanku osončja skupaj s Soncem. V eni izmed začetnih faz v procesu nastanka zvezde iz zgoščujoče se protozvezde z veliko hitrostjo izhajata dva nasprotno usmerjena curka plina in prahu (zvezde razreda T Tauri). Po mnenju Shuja in soavtorjev (SHU et al, 1996 v SEARS, 2004) naj bi hondrule nastale iz materiala iz obeh zvezdnih curkov. Skupina teorij o neposredni kondenzaciji iz meglice podpira mnenje, da so hondrule nastale neposredno iz prvotne solarne meglice. Hondrule naj bi nastajale pri visokih tlakih in temperaturah, ki jih običajno v meglicah ni. Nastanek hondrul bi lahko spodbudili močni Sončevi koronarni izbruhi v začetni fazi nastajanja Sonca. Druge možnosti pa so, da naj bi nastanek hondrul inducirale strele v meglicah ali pa močno magnetno polje. Nekateri menijo, da je nastanek hondrul sprožil močan udarni val, ki se je razširil skozi meglico. Naslednja skupina teorij razlaga nastanek hondrul z medzvezdnim prahom, ki se je razširil skozi (Sončevo) meglico z veliko hitrostjo in se ob tem (zaradi trenja z meglico) tako močno ogrel, da se je (deloma) stalil. Iz nastale taline so kristalile hondrule.

Tudi teorije nastanka hondrul na starševskih telesih se delijo v osnovi na dve skupini teorij. Prva zagovarja, da so hondrule posledica vulkanske dejavnosti na površini starševskih teles. Druga teorija pa trdi, da so hondrule nastale ob trkih starševskih teles. Teorije nastanka z vulkanizmom in ostalo vulkansko dejavnostjo na starševskih telesih so se pojavile že na prehodu iz 19. v 20. stol. (SEARS, 2004). V tem času so znanstveniki menili, da so hondrule posamezni ločeni (mikro)meteoriti, ki so nastali z razpadom trdnih teles. TSCHERMARK (1883 v SEARS, 2004) je menil, da hondrule kažejo značilnosti tufov. HAIDINGER (1867 v SEARS, 2004) je bil prvi, ki je hondrule povezal z vulkansko aktivnostjo oz. z vulkansko erupcijo na starševskem telesu. BORGSTROM (1904 v SEARS, 2004) je opazil, da je raznovrstnost hondrul tako velika, da so hondrule morale nastati ločeno in so se kasneje združile v skupnem telesu. V hondritih je opazil tudi žile kovinskih mineralov, ki so nastale po združitvi hondrul, kar zopet kaže na to, da so bili hondriti nekoč del večjih teles. BREZINA (1885 v SEARS, 2004) je predlagal, da so hondrule kristalizirale iz magme. KLEIN (1906 v SEARS, 2004) je hondrule povezal s sferoliti. WAHL (1910 v SEARS, 2004) pa je menil, da so hondrule



silikatna talina, ki se je ohladila v ogreti atmosferi starševskega telesa. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je bil prvi, ki je razložil nastanek porfirskih in neporfirskih hondrul. Porfirske hondrule naj bi bile abradirani fragmenti taline, neporfirske hondrule pa naj bi bile združene kapljice »dežja« staljene taline. RINDGWOOD (1959 v SEARS, 2004) je predlagal nastanek hondrul z dvigom z vodo obogatene magme na površje starševskega telesa. Hondrule naj bi ob tem nastale na tri različne načine: s sferolitsko kristalizacijo, s hitro precipitacijo z magnezijem bogatih silikatov kot posledica izgube železa na površju in s kavitacijo (hitro kristalizacija viskozne taline, ujete v mehurčke pare). Prva, ki sta razlagala nastanek hondrul s kolizijo med starševskimi telesi, sta bila UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004). Hondrule naj bi nastale ob trku med telesoma (asteroidoma) s premerom 10 in 100 km. Ob tem naj bi se sprostila dovolj velika količina energije, da sta se telesi deloma stalili. Iz nastale taline pa so kristalizirale hondrule. Obe telesi sta ob koliziji tudi razpadli in se kasneje tudi združili v kup gravitacijsko šibko vezanega drobirja (angl. *rubble pile asteroid*). Teorijo je UREY (1967 v SEARS, 2004) dopolnil s tem, da je šlo za trk z očetovskim telesom velikosti Lune, ker imajo manjša telesa (majhni asteroidi) premajhno gravitacijo, da bi lahko zadržale ob koliziji nastale hondrule. Nekateri petrologi so mnenja, da imajo hondrule petrološke značilnosti, ki nakazujejo na to, da so bile nekoč del večjega telesa. UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004) sta predlagala, da naj bi hondrule nastale ob udarcu z bazeni staljene magme, ki so nastale ob koliziji med večjimi telesi. Teorijo o nastanku hondrul s trkom s staljnim telesom je nadgradil SANDERS (1996 v SEARS, 2004).

Posamezne hondrule niso homogene čez celoten presek hondrule, pač pa jih obdaja skorjica, ki ima drugačno teksturo kot njeno jedro. Obstajata dva osnovna tipa skorjic hondrul – drobnozrnate in debelozrnate skorjice. Drobnozrnate skorjice sestavljajo zrna premera 10–30  $\mu\text{m}$  s posameznimi zrnji submikronskih dimenzij. Drobnozrnate skorjice naj bi nastale z akrecijo prahu iz solarne meglice na že formirane hondrule. Zato se ta tip skorjic v literaturi pojavlja tudi pod imenom akrecijski prašni plašč (angl. *accretion dust mantle*). Ta tip skorjice obdaja tudi reliktna zrna, drobce hondrul ter kalcijevo-aluminijeve vključke. Po kemični sestavi so skorjice zelo podobne sestavi osnove hondrita, s katero so v stiku. Sestava posameznih skorjic je zelo homogena. Vendar vsebnost FeO in MgO ter litofilnih elementov v skorjicah v navadnih hondritih lahko zelo variira med posameznimi hondrulami. Skorjice ne kažejo znakov taljenja in delujejo kot »sedimentne« teksture. (VOGEL et al., 2003). Pogosto hondrule obdaja več plasti drobnozrnatih skorjic z različno kemično sestavo.

Debelozrnate skorjice sestavljajo zrna, ki imajo v navadnih hondritih v povprečju premer 150  $\mu\text{m}$ , v CV3 hondritih pa celo do 400  $\mu\text{m}$ . Kemična sestava debelozrnatih skorjic je zelo podobna sestavi osnove meteorita in tudi drobnozr-

natih skorjic. Delijo se na skorjice z visoko vsebnostjo FeO in skorjice z nizko vsebnostjo FeO. Prve so v 80 % primerov deloma ali popolnoma staljene, druge pa v okoli 50 % primerov. Zaradi tega, ker debelozrnate hondrule kažejo znake taljenja, jih imenujemo tudi magmatske hondrule. To nakazuje, da so debelozrnate skorjice nastale iz hondrul samih. Pogosto so v debelozrnatih skorjicah vključki drobnozrnatih skorjic (NORTON, 2002).

MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je opazil, da skorjice vsebujejo cone kovin in sulfidov. Morfill in sodelavci (MORFILL et al., 1993 v SEARS, 2004) so na podlagi debeline skorjic ugotavljali njihovo zgodovino. Opazili so, da imajo večje hondrule debelejšje skorjice. Vendar je razmerje med debelino in velikostjo skorjice odvisno od vrste hondrule. Hondrule, revne z lahko hlapnimi komponentami (tip A), imajo debelejšje skorjice kot hondrule, bogate z lahko hlapnimi komponentami (tip B). To nakazuje, da so skorjice nastale iz elementov, ki so izhlapeli iz hondrule in kasneje kondenzirali na zunanji strani hondrule (SEARS, 2004).

### Klasifikacija hondrul

Raziskovalci so izdelali več klasifikacij, po katerih delimo in razlikujemo hondrule, ki sestavljajo kamnite hondrite. Klasifikacije smo povzeli po Searsu (SEARS, 2004) in Nortonu (NORTON, 2002) in jih enako kot Sears in Norton poimenujemo kar po njihovih avtorjih. Prvi je hondrule razdelil TSCHERMAK (1883 v SEARS, 2004) na osnovi mineralne sestave v razrede: olivinove, olivino-piroksenove, avgitove, plagioklazove, steklaste, potemnele hondrule ter hondrule s skorjicami, bogatimi z železom. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je hondrule razdelil na porfirske in neporfirske hondrule. Termin (ne)porfirska hondrule je sposoben iz petrologije magmatskih kamnin in označuje obliko ter velikost kristalov v hondruli. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je bil tudi prvi, ki je opisal skorjice hondrul ter kompleksne združene hondrule, ki ležijo ena znotraj druge. KIEFFER in KING (1975 v SEARS, 2004 in KING, 1983 v SEARS, 2004) sta predlagala klasifikacijo, na podlagi katere hondrule delimo na kapljičaste in litične hondrule. Kapljičaste hondrule naj bi bile kristaljena talina, medtem ko naj bi bile litične hondrule fragmenti magmatskih kamnin. Ta klasifikacija je podobna Merrillovi delitvi na porfirske in neporfirske hondrule (MERRILL, 1920 v SEARS, 2004). GOODING in KEIL (1981 v SEARS, 2004) sta hondrule razdelila na podlagi mineralne sestave v naslednje skupine: porfirske hondrule, neporfirske hondrule ter na zrnate hondrule. Prav tako sta opisala mineralno sestavo ter strukturo posameznih skupin in tipov hondrul.

V skupino porfirskih hondrul sodijo naslednji tipi hondrul: porfirske olivino-piroksenove hondrule (POP), porfirske olivinove hondrule (PO) in porfirske piroksenove hondrule (PP). V skupino neporfirskih hondrul pa sodijo pahljačaste

piroksenove hondrule (RP), lamelarne olivinove hondrule (BO) in pa kriptokristalne hondrule (C). Skupino zrnatih hondrul sestavljajo zrnate olivinove hondrule (GO), zrnate piroksenove hondrule (GP) in zrnate olivinovo-piroksenove hondrule (GOP). Porfirske hondrule nastanejo z lepljenjem zrn okrog kondenzacijskih jeder (NORTON, 2002). Med procesom nastanka so bile le delno nataljene. Porfirske olivinovo-piroksenove hondrule so najpogostejše hondrule. Sestavljajo jih velika zrna olivina in klinoenstatita. Zrna klinoenstatita so v obliki polisintetskih dvojčkov. Porfirske piroksenove hondrule so sestavljene izključno iz zrn piroksena. So najmanj pogost tip porfirskih hondrul. Porfirske olivinove hondrule običajno sestavljajo evhedralna do subhedralna zrna olivina, ki plavajo med mikrokristalno osnovo.

Neporfirske hondrule nastanejo iz kapljic taline (SEARS, 2004). Obnašanje nekaterih litofilnih elementov (Ca, Al, Ti, REE) v teh hondrulah kaže na to, da so bile hondrule kemično zaprt sistem. Kristalizacija iz taline okrog nukleacijskega jedra naj bi bila hipna. Med temi hondrulami so najpogostejše pahljačaste piroksenove hondrule. Hondrule sestavljajo drobna (premer 1-20  $\mu\text{m}$ ) in zelo podolgovata zrna rombičnega piroksena, med njimi pa so ksenomorfna zrna plagioklazov in zrna kovinskih mineralov. Zrna običajno kristalijo iz ene same nukleacijske točke, kar daje značilno pahljačasto teksturo. Lahko pa je nukleacijskih točk tudi več ali pa te ležijo izven centra hondrule. Takim hondrulam pravimo tudi ekscentrične pahljačaste hondrule. Pahljačaste piroksenove hondrule v meteoritih petroloških tipov 4, 5 in 6 običajno niso okrogle, ampak bolj spominjajo na morske školjke pokrovače, kar je posledica kemične erozije, ki jih je korodirala po robovih. Lamelarne olivinove hondrule so enostavno prepoznavne, saj so zgrajene iz med seboj vzporednih zrn olivina. Ena izmed kristalografskih osi olivina je močno podaljšana, kar daje lamelarno teksturo, med lamelami pa so zrna plagioklazov in zrna železovo-nikljevih mineralov. Obstajajo tudi hondrule, ki imajo zrna olivina orientirana v več različnih smereh. Take hondrule se imenujejo polisomatske lamelarne hondrule. Kriptokristalne hondrule se pojavljajo redko in jih sestavljajo kriptokristalna zrna rombičnega piroksena ter steklo. V njih ni nobene prepoznavne teksture.

Hondrule iz skupine zrnatih hondrul so precej redke. Zato nekateri to majhno skupino hondrul združujejo s skupino neporfirskih hondrul. Najpogostejši tip teh hondrul pa so GOP hondrule. Običajno jih sestavljajo anhedralna zrna piroksena in olivina, manjša od 10  $\mu\text{m}$ , s slabo definiranimi mejami (LAURETA et al., 2006). Vsa zrna, ki sestavljajo zrnate hondrule, so približno enako velika in so zelo tesno zložena ter potopljena v steklasto mezostazo. Hondrulo navadno obdaja skorjica, sestavljena iz enakih, vendar bolj debelelozrnatih mineralov.

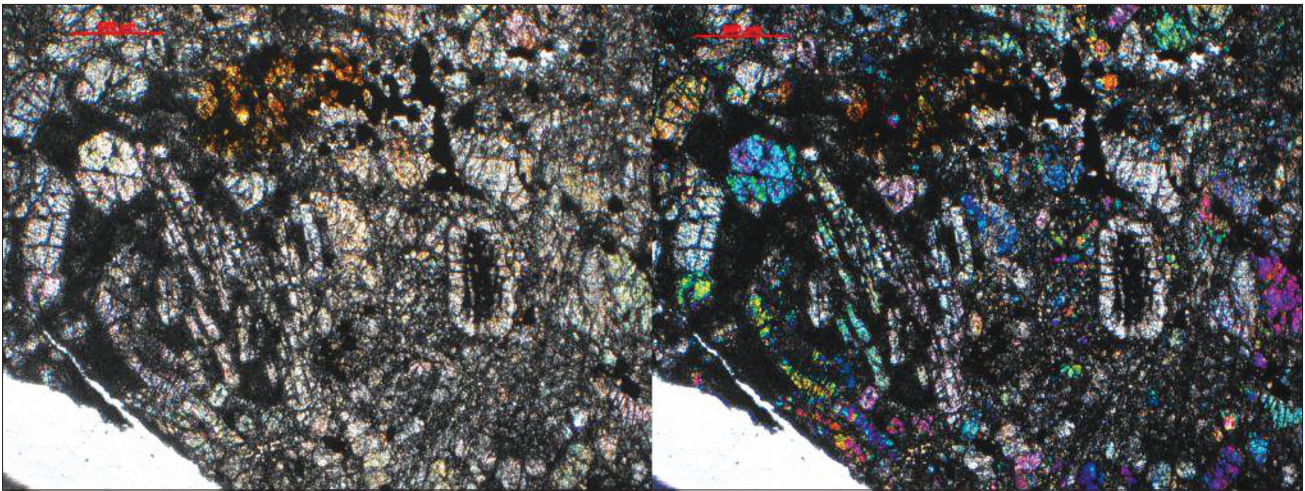
Poleg vseh naštetih hondrul obstajajo še kovinske hondrule (M), ki so med vsemi hondrulami v navadnih hondritih najredkejša (< 1 %).

Sestavljene so iz kovinskih Fe-Ni mineralov, troilita (FeS) in iz akcesornih zrn schreibersita ((Fe, Ni)<sub>3</sub>P) in elementarnega Cu.

V meteoritu Jesenice kljub intenzivni rekristalizaciji lahko prepoznamo različne vrste hondrul. Maloštevilne so tiste, ki imajo pravilno okroglasto obliko. Več je takih, kjer lahko prepoznamo samo dele hondrule. Njihovo obliko, mineralno sestavo in obstoj skorjic smo ugotavljali v poliranih zbruskah z optičnim mikroskopom v presewni svetlobi. Pri posameznih tipih hondrul smo lažje prepoznavali njihovo sestavo in strukturo v poliranem brusku z vrstičnim elektronskim mikroskopom s povratno sipanimi (BSE) elektroni. Z elektronskim mikroskopom so jasno vidne meje med posameznimi mineralnimi zrni. Zato lažje določimo tudi mejo hondrule. Različne minerale med seboj ločimo posredno glede na sivo/bel odtenek površine. Kovinski minerali so svetlejši od nekovinskih mineralov. Ker je ločljivost elektronskega mikroskopa večja od ločljivosti optičnega mikroskopa, smo lahko prepoznali tudi najbolj drobnozrnate nekovinske minerale.

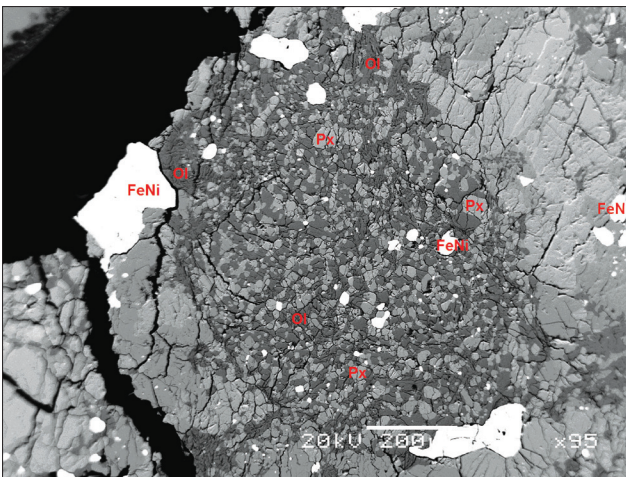
V meteoritu Jesenice se iz skupine porfirskih hondrul pojavljajo: porfirske olivinovo-piroksenove hondrule (POP) (sl. 6), porfirske olivinove hondrule (PO) (sl. 7 in sl. 8) in porfirske piroksenove hondrule (PP) (sl. 9). Iz skupine neporfirskih hondrul smo v meteoritu Jesenice odkrili pahljačaste piroksenove hondrule (RP) (sl. 10 in sl. 11) in lamelarne olivinove hondrule (BO) (sl. 12 in sl. 13). Na sliki 11 so vidna tanka (premer 1-20  $\mu\text{m}$ ) in zelo podolgovata zrna rombičnega piroksena. Temneje siva zrna plagioklazov z elektronskim mikroskopom lažje ločimo od piroksenovih letvic. Drobna izometrična zrna kovinskih mineralov so s povratno sipanimi elektroni (BSE) videti najsvetlejša. Skupino zrnatih hondrul predstavljajo olivinovo-piroksenove hondrule (GOP) (sl. 14). V vzorcu meteorita Jesenice smo odkrili tudi kovinsko hondrulo (M) (sl. 15 in sl. 16), ki je v navadnih hondritih sicer najmanj pogosta. Drobna zrna Fe-Ni mineralov plavajo v osnovi s kemično sestavo plagioklazov. S preiskavo v presewni svetlobi nismo mogli prepoznati, ali imamo opravka s kristalno obliko osnove, ali je steklasta faza s sestavo plagioklazov. Na sestavo plagioklazov sklepamo po odtenku sive barve, ki jo vidimo pri detekciji povratno sipanih elektronov (BSE).

Wood in McSweenova klasifikacija hondrul (WOOD, 1962 v SEARS, 2004 in MCSWEEN et al., 1983 v SEARS, 2004) v ogljikovih hondritih pozna delitev na osnovi kemijske in mineralne sestave na tri razrede in sicer: razred I (olivini z majhno vsebnostjo železa), razred II (olivini z veliko vsebnostjo železa) ter razred III (neporfirske hondrule). Scott-Taylor-Jonesova (SCOTT, et. al., 1989 v SEARS, 2004, JONES et al., 1989 v SEARS, 2004, JONES, 1994 v SEARS, 2004) klasifikacija hondrul je posodobila predhodno Wood-McSweenovo klasifikacijo. Hondrule tipa-I vsebujejo z FeO osiromašena olivin ter piroksen (Fo in En > 90). Hondrule tipa-II vsebujejo z FeO obogatena olivin in piroksen (Fo in En < 90). Hondrule tipov I in II so



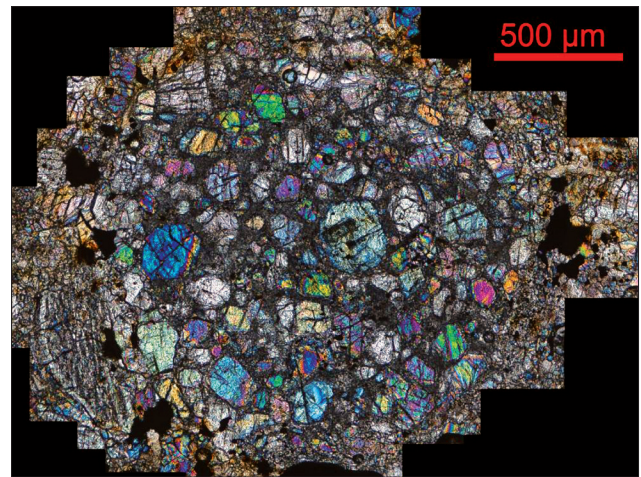
Sl. 5. Meteorit Jesenice. Številne zelo rekrystalizirane olivinove hondrule. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 5. Meteorite Jesenice. Recrystallized texture of many olivine chondrules. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



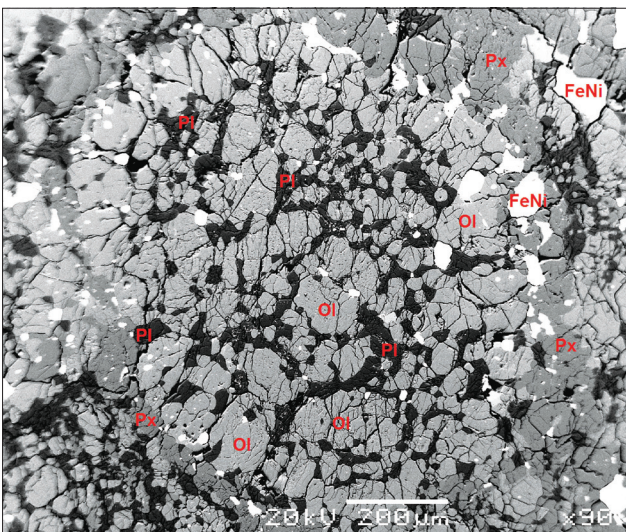
Sl. 6. Meteorit Jesenice. Porfiriska olivinova-piroksenova hondrula. Zrna olivina (Ol) in piroksena (Px) v temni osnovi, ki ima sestavo glinenecv. Dobro vidna so redka zrna železovo-nikljevih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

Fig. 6. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine-pyroxene chondrule. Olivine (Ol) and pyroxene (Px) grains in dark matrix with composition of feldspar. There are also present rare grains of iron-nickel minerals (FeNi). SEM, BSE



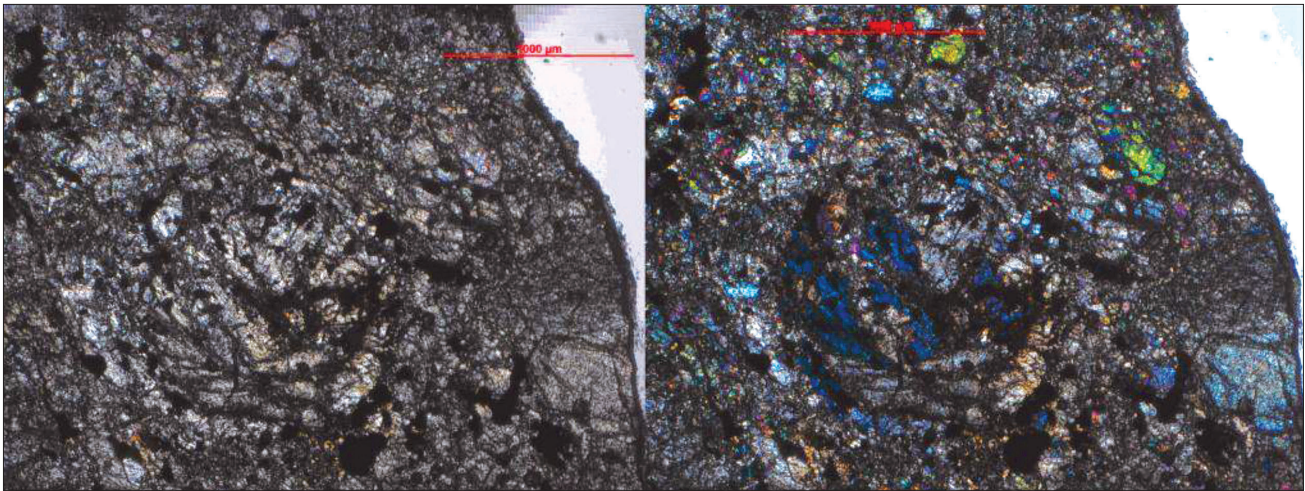
Sl. 7. Meteorit Jesenice. Porfiriska olivinova hondrula. Hondrulo sestavljajo evhedralna do subehedralna zrna olivina, poplajena v drobnorzrnati osnovi. Presevna polarizirana svetloba, x nikoli.

Fig. 7. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine chondrule. Chondrule is composed of euhedral to subhedral olivine grains embedded in fine grained matrix. Plane-polarized light, x nicols.

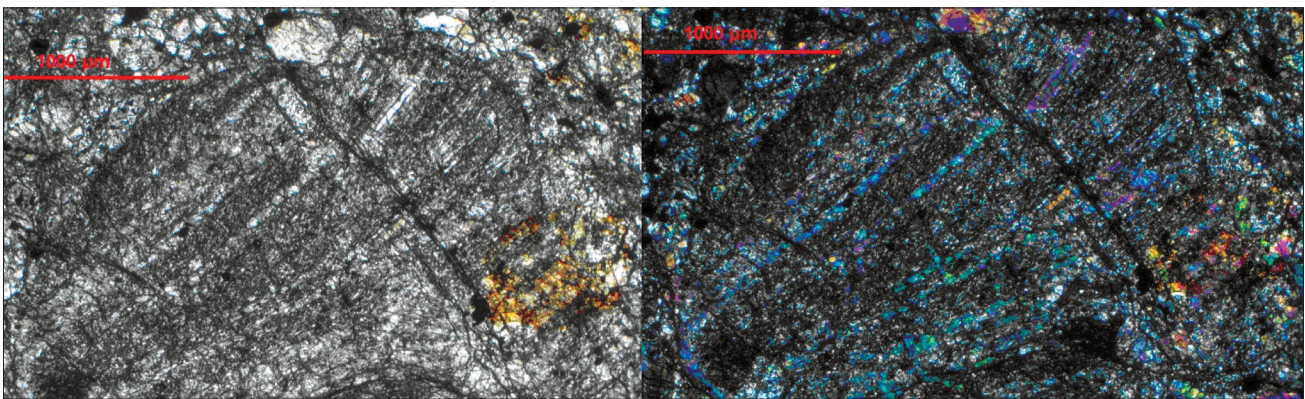


Sl. 8. Meteorit Jesenice. Porfiriska olivinova hondrula s skorjico. Hondrulo sestavljajo zrna olivina (Ol) in plagioklaza (Pl). Skorjico tvorijo zrna piroksena (Px) in kovinskih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

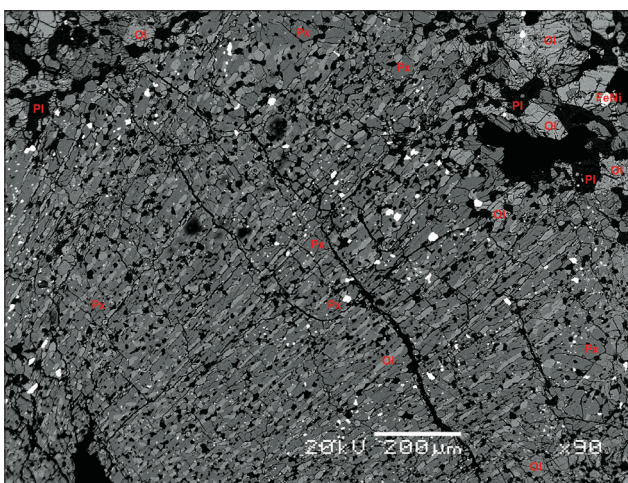
Fig. 8. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine chondrule with rim. Chondrule is composed of olivine (Ol) and plagioclase (Pl). Chondrule rim is composed of pyroxene (Px) and iron-nickel minerals (FeNi). SEM, BSE.



Sl. 9. Meteorit Jesenice. Porfirnska piroksenova hondula. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno)  
 Fig. 9. Meteorite Jesenice. Porphyritic pyroxene chondrule. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).

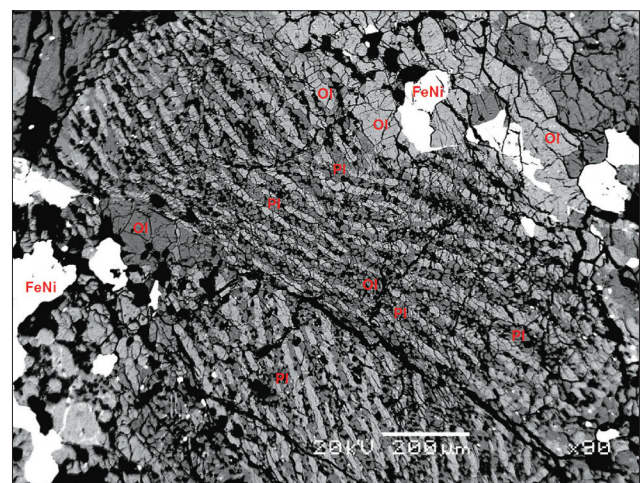


Sl. 10. Meteorit Jesenice. Pahljačasta piroksenova hondula. Drobnna piroksenova zrna rastejo usmerjeno iz skupne nuklacijske točke. Siva zelo drobnnozrnata osnova ima sestavo glinencev. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).  
 Fig. 10. Meteorite Jesenice. Radial pyroxene chondrule. Fine-grained pyroxene crystals grow out of the common nucleation point. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



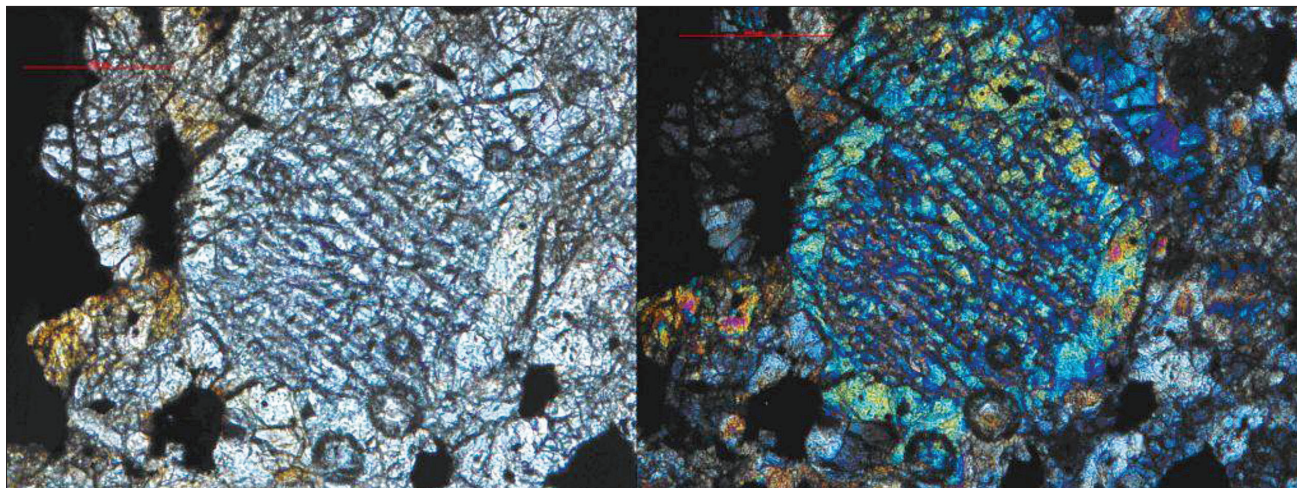
Sl. 11. Meteorit Jesenice. Pahljačasta piroksenova hondrula, ki jo sestavljajo podolgovata zrna piroksena (Px) in olivina (Ol), zrna s sestavo glinencev (Pl) in železovo-nikljevih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

Fig. 11. Meteorite Jesenice. Radial pyroxene chondrule, which is composed of elongated pyroxene (Px) and olivine grains (Ol), feldspar (Pl) and iron-nickel (FeNi) minerals. SEM, BSE.



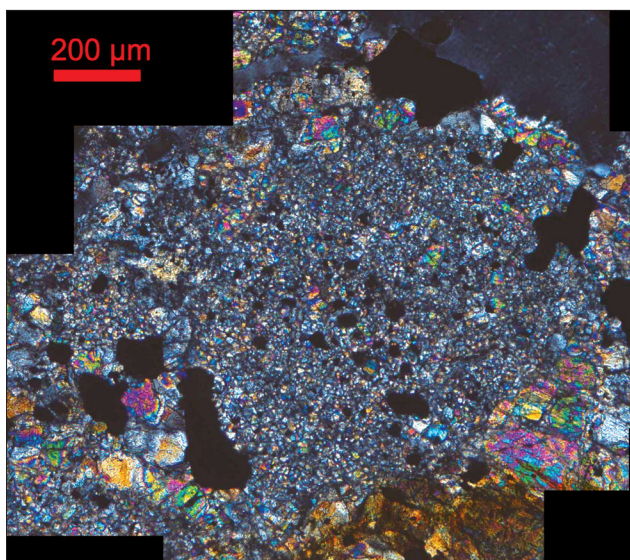
Sl. 13. Meteorit Jesenice. Polisomatska lamelarna olivino-va hondrula je zgrajena iz podolgovatih zrn olivina (Ol) in plagioklaza (Pl) ter iz železovo-nikljevih mineralov (FeNi) v različnih orientacijah. SEM, BSE.

Fig. 13. Meteorite Jesenice. Polysomatic barred olivine chondrule is composed of elongated olivine (Ol) and plagioclase (Pl) grains, and iron-nickel minerals (FeNi) in different orientations. SEM, BSE



Sl. 12. Meteorit Jesenice. Lamelarna olivinova hondrula z debelo-zrnato skorjico. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 12. Meteorite Jesenice. Barred olivine chondrule with coarse-grained rim. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



Sl. 14. Meteorit Jesenice. Zrnata olivinova-piroksenova hondrula. Zrna olivina in piroksena so dovolj velika, da jih z optičnim mikroskopom prepoznamo. Velikost zrn se proti robu hondrule povečuje. Presevna polarizirana svetloba, x nikoli.

Fig. 14. Meteorite Jesenice. Granular olivine-pyroxene chondrule. Olivine and pyroxene grains are large enough that are recognizable with an optical microscope. The size of mineral grains is increasing toward the edge of chondrule. Plane-polarized light, x nicols.

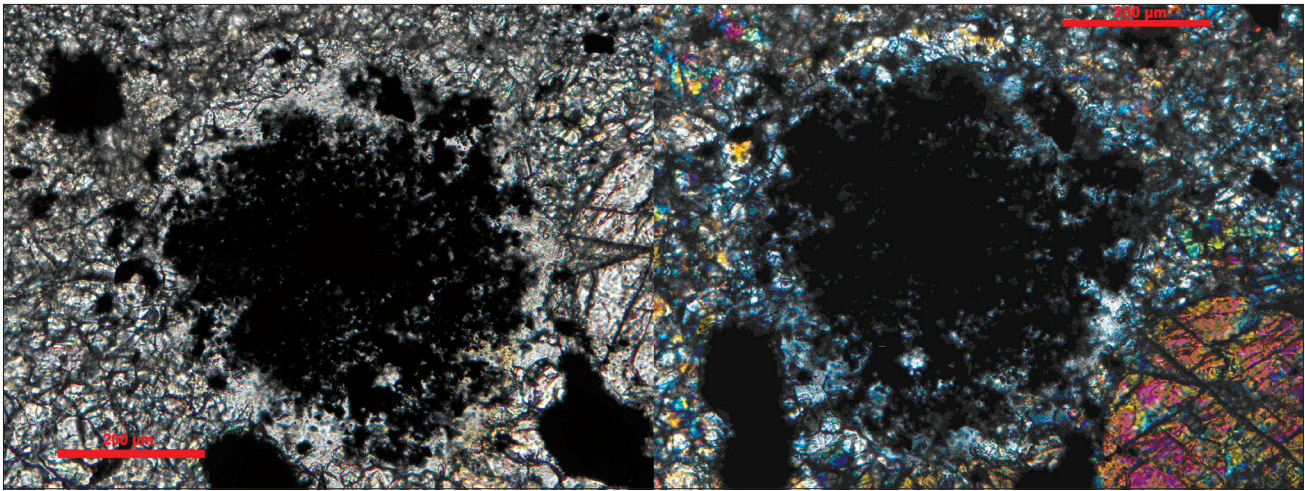
razdelili na več podtipov. Hondrule tipa-IA in tipa-IIA vsebujejo več kot 80 vol.% olivina. Hondrule tipa-IB in tipa-IIB pa vsebujejo več kot 80 vol.% piroksena. Hondrule z mešano sestavo sodijo v tip-IAB in tip-IIAB. Oznaka A pomeni, da hondrula vsebuje več kot 80 vol.% olivina, oznaka B pa, da hondrula vsebuje več kot 80 vol.% piroksena. Oznaka AB pa pomeni, da gre za hondrulo z mešano sestavo olivina in piroksena. Po Searsovi klasifikaciji (SEARS et al., 1992 v SEARS, 2004) so hondrule razdeljene v razrede na podlagi sestave njihove mezostaze in prevladujočega minerala (olivina ali piroksena). Za določitev sestave mezostaze se uporablja fazni diagram kremen

- albit - anortit. Za sestavo olivina oz. piroksena pa se uporablja fazni diagram FeO - CaO. Kalcij je pomembna sledna prvina v opisanem sistemu olivina.

Zaporedje kristalizacije mineralov, ki sestavljajo hondrulo, je odvisno od povprečne sestave hondrule in od stopnje termične metamorfoze. V večini hondrul iz taline najprej začne kristaliti olivin (sl. 17). To se zgodi pri temperaturah 1400-1600 °C. Zato so zrna olivina zelo pogosto evhedralne oblike. Naslednja iz taline kristalijo zrna zlitine železa in niklja, ki vsebujejo manj kot 5.2 atom.% Ni (sl. 18). To poteka pri temperaturah 1513-1536 °C. Pri tem nastanejo minerali s kubično telesno centrirano osnovno celico. Sledi kristalizacija zrn zlitine železa in niklja, ki vsebujejo več kot 5.2 atom.% Ni. Temperatura kristalizacije z naraščajočo vsebnostjo Ni pada in doseže minimum pri 1425 °C ter vsebnosti Ni 60-70 atom.%. Taki minerali imajo kubično ploskovno centrirano osnovno celico (LAURETTA et al., 2006). Sledi kristalizacija piroksenovih zrn. Klinopiroksen kristalizira približno pri temperaturi 919 °C, ortopiroksen pa pri temperaturi okrog 799 °C. Pri hondritih vseh tipov klinopiroksen kristalizira pri višji temperaturi kot ortopiroksen. V L hondritih kristalizira klinopiroksen večinoma pri temperaturi 927 °C, ortopiroksen pa pri temperaturi 813 °C (HARVEY et al., 1993). V primeru nekaterih hondrul v navadnih hondritih se zaporedje kristalizacije olivina in piroksena menjava. Piroksen in olivin se lahko celo med seboj preraščata. Zadnji kristalizirajo glinenci. Njihova kristalizacija poteka pri temperaturah 750-850 °C (VAN SCHMUS et al., 1968). Zato so zrna glinencev pogosto anhedralna.

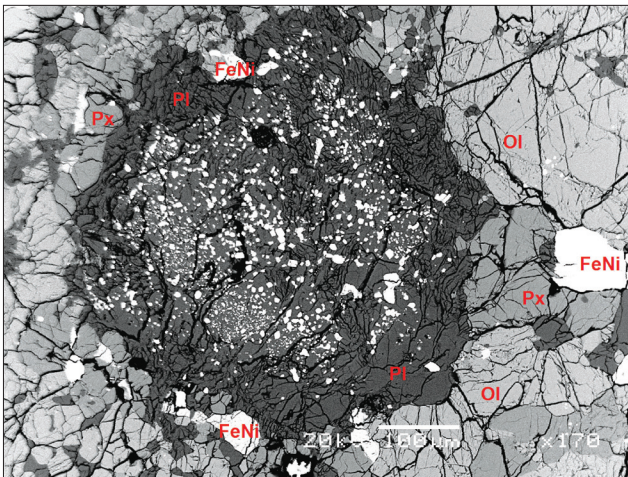
Kemična sestava piroksenov v meteoritu Jesenice se spreminja: MgO 22,1 do 14,0 mas.%, SiO<sub>2</sub> 50,9-54,6 mas.%, CaO 15,6 do 15,2 mas. % in FeO 11,3 do 6,6 mas.% (ŠMIT et al., 2011).

Relikti so zrna olivina in ortopiroksena s kemično sestavo, ki se bistveno razlikuje od kemične sestave zrn enakih mineralov v isti hondruli, v



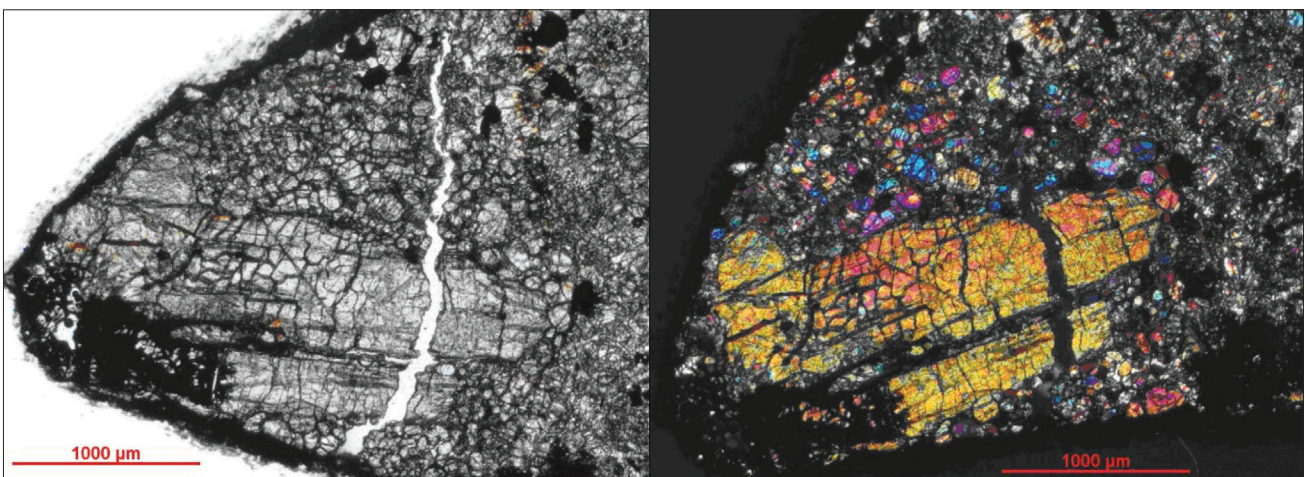
Sl. 15. Meteorit Jesenice. Kovinska hondrula. Središče hondrule je sestavljeno predvsem iz drobnih zrn nepresevnih železovo-nikljevih mineralov. Skorjico oblikujejo zrna glincev. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 15. Meteorite Jesenice. Metal chondrule. The central part of chondrule is composed mostly of opaque iron-nickel minerals. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



Sl. 16. Meteorit Jesenice. Kovinska hondrula, ki jo sestavljajo zrna železovo-nikljevih mineralov (FeNi) potopljena v osnovo, ki jo sestavljajo zrna plagioklaza (Pl). Plagioklazi sestavljajo tudi skorjico hondrule. V okolici hondrule so vidna še zrna olivina (Ol) in zrna piroksena (Px). SEM, BSE.

Fig. 16. Meteorite Jesenice. Metal chondrule, which is composed of iron-nickel minerals (FeNi) embedded in plagioclase matrix (Pl). Plagioclase also forms chondrule rim. In the chondrule surroundings are pyroxene (Px) and plagioclase (Pl) grains also present. SEM, BSE.

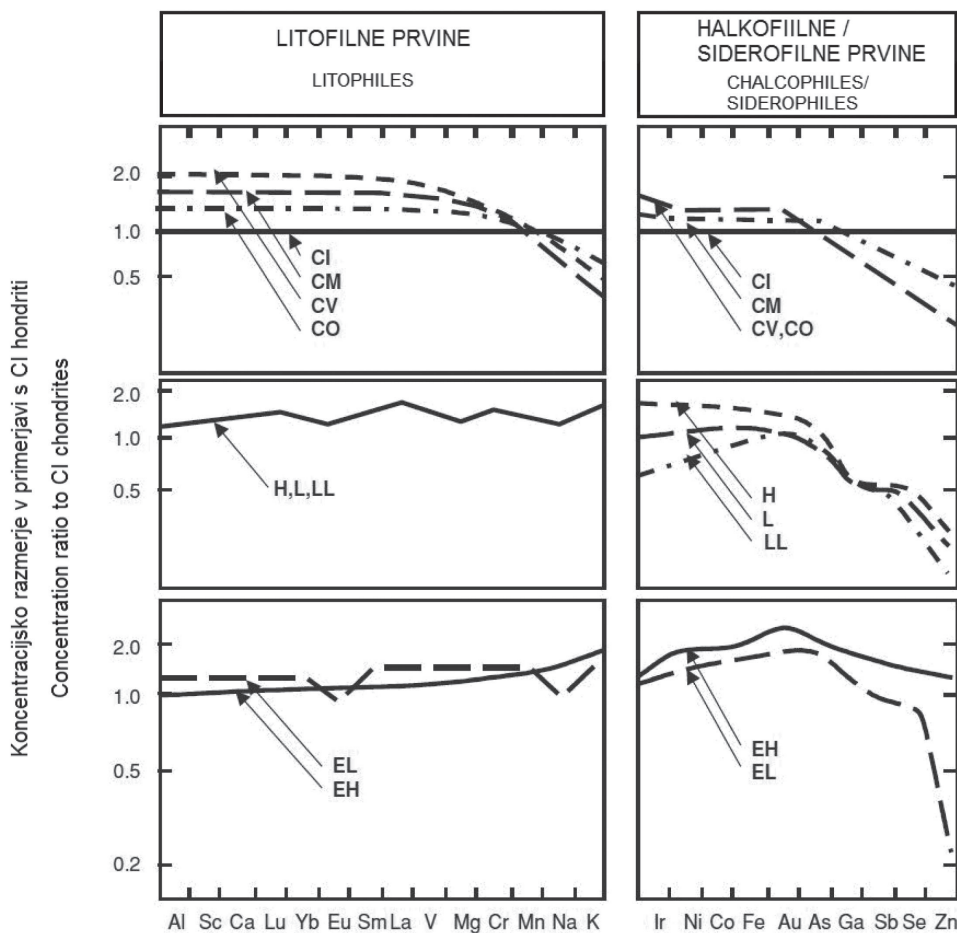


Sl. 17. Porfiriska olivinova hondrula z reliktnim zrnom olivina. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 17. Porphyritic olivine chondrule which contains olivine grain. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).

kateri leži relik (LAURETA et al., 2006). Predvsem se razlikujejo v vsebnosti FeO. Reliktne zrna imajo pogosto conarno sestavo, kar je v neskladju z in situ kristalizacijo iz taline gostiteljske hondrule. Prevladuje mnenje, da so relikti minerali

predhodniki hondrul, ki so preživeli proces formiranja hondrul ne da bi se stalili ali raztopili. Zato relikti predstavljajo možnost za študij kemične in mineralne sestave predhodnikov hondrul. JONES (1996) je podal oceno, da 15 % vseh hondrul



Sl. 18. Kemična sestava hondritov glede na standard CI hondrit (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 18. Chemical composition of chondrites according to CI chondrite standard (adopted according to SEARS, 2004)

vsebuje relikte, RAMBALDI (1981) pa ocenjuje, da relikte vsebuje polovica vseh porfirskih hondrul v nehomogenih navadnih hondritih.

V eni izmed hondrul v vzorcu meteorita Jesenice smo odkrili veliko poligonalno zrno olivina, ki smo ga zaradi velikosti in oblike označili za reliktno zrno (sl. 17). To zrno je po velikosti močno odstopalo od vseh ostalih olivinovih zrn v isti hondruli. Z raziskavami, ki bodo sledile, bomo določili kemično sestavo tega zrna in tako potrdili ali ovrgli teorijo o reliktnem zrnu.

Sortiranje hondrul glede na velikost je osnovna lastnost in posledica formacijskih mehanizmov. Poznamo več vrst sortiranja hondrul – teorije frakcionacije, ki jih poimenujemo po glavnem mehanizmu sortiranja ali po njihovih avtorjih (SEARS, 2004). Aerodinamsko sortiranje pomeni sortiranje hondrul med prehodom skozi oblak plina in prahu. Whipple (WHIPPLE, 1966 v SEARS, 2004) je predlagal, da planetezimal pri prehodu skozi oblak plina in prahu zajame samo večje hondrule zaradi njihove večje obstojnosti pri potovanju skozi viskozno tekočino. Teorija balističnega sortiranja predpostavlja, da je sortiranje potekalo med premikanjem od kraja nastanka do današnje lokacije hondrule v meteoritu. Tretja vrsta sortiranja pa je abrazijsko sortiranje. Po tej teoriji naj bi bile nekatere vrste hondrul abradirani fragmenti magmatskih kamnin. Obstajata tudi dve glavni skupini teorij frakcionacije kovin in silikatov. Prva skupina teorij predpostavlja, da je ta proces potekal v solarni meglici, po drugi pa naj bi potekal na

starševskem telesu meteoritov. Teorijo frakcionacije v meglici sta predlagala DONN in SEARS (1963 v SEARS, 2004). Menila sta, da je ločitev kovin od silikatov v meglici rezultat počasnejšega procesa akrecije zrn kovin kot akrecije zrn silikatov. DODD (1981 v SEARS, 2004) je predlagal, da je vzrok za frakcionacijo v aerodinamskem sortiranju. LARIMER in WASSON (1988 v SEARS, 2004) sta menila, da so bili na začetku vsi elementi v meglici v plinasti obliki. Frakcionacija naj bi bila posledica različnih temperatur kristalizacije kovin in silikatov. Nastala trdna snov naj bi iz območja formiranja padla v osrednji del osončja v različnih časih, kar naj bi pojasnilo frakcionacijo. LARIMER in ANDERS (1967 v SEARS, 2004) vidita vzrok za frakcionacijo v vsebnosti siderofilnih elementov in s tem povezanim magnetizmom. Teorije frakcionacije na starševskem telesu so vpeljali UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004) ter ANDERS (1964 v SEARS, 2004). Po njihovem mnenju je edina možnost za ločitev kovin od silikatov na starševskih telesih taljenje in kasnejša gravitacijska separacija. HUANG in sodelavci (1996 v SEARS, 2004) so mnenja, da je prišlo do ločitve med kovinami in silikati zaradi aerodinamskega in gravitacijskega sortiranja na starševskem telesu. Sortiranje naj bi potekalo v regolitu (vrhnjem sloju starševskega telesa), ko so se iz notranjosti sproščale lahko hlapne komponente.

Osnova hondritov naj bi nastala iz solarne meglice ali pa naj bi šlo za mezostazo hondrul. Sestava osnove navadnih hondritov je odvisna

predvsem od petrološkega tipa meteorita. Nižji petrološki tipi vsebujejo drobnnoznančno osnovo z olivinom, revnim z FeO, drugimi silikati, spinelom, kovinami, sulfidi in kalcitom. Z naraščanjem petrološkega tipa osnova v meteoritih postaja vse bolj debelozrnata ter podobna zrnem, ki sestavljajo hondrule. Prav tako imajo višji petrološki tipi vse manj vode in ogljika ter vse več kovin (SEARS, 2004).

Povprečno kemično sestavo hondritov primerjamo vedno kot razmerje glede na povprečno kemično sestavo CI hondritov. To razmerje je prikazano na sliki 20 (SEARS, 2004). Iz grafa je razvidno, da navadni hondriti vsebujejo 1.2 do 1.5 kratno količino litofilnih prvin kot ogljikovi hondriti. So pa navadni hondriti osiromašeni z nekaterimi siderofilnimi in halkofilnimi prvimi, kot so npr. Ga, Sb, Se in Sn. EH hondriti so malenkostno obogateni z nekaterimi redkimi zemljami ter bolj obogateni predvsem z Mn, Na in K. EL hondriti pa so predvsem zelo osiromašeni s Se in Zn. Kemično sestavo hondrul so ugotavljali GROSSMAN IN WASSON (1983 v SEARS, 2004), KALLEMEYN (1988 v SEARS, 2004) in HUANG in sodelavci (1996, v SEARS, 2004) večinoma z nevtronsko aktivacijsko analizo. Rezultati so pokazali, da so hondrule z majhno količino FeO (v vseh razredih hondritov) osiromašene z litofilnimi elementi, kot so krom, mangan, natrij in kalij, v primerjavi s CI ogljikovi hondriti. Obratno pa velja, da imajo hondrule z veliko vsebnostjo FeO podobno količino litofilnih elementov kot CI hondriti.

### Zaključek

Če v zaključku povzamemo ugotovitve o klasifikaciji meteorita Jesenice in jih združimo z ugotovitvami, ki jih je podal Bischoff s sodelavci (BISCHOFF et al., 2011) v svojem članku, je tekstura meteorita Jesenice zelo močno rekristalizirana z majhnim številom dobro definiranih hondrul. Zato meteorit Jesenice uvrščamo v petrološki tip 6. Najbolj pogosto mineralno fazo v meteoritu Jesenice predstavlja olivin. Zrna olivina zelo variirajo po obliki in velikosti. Večina jih ima močno valovito potemnitev. Poleg tega pa se v olivinu pojavljajo tudi planarne razpoke ali udarne lamele. Zato meteorit Jesenice glede na stopnjo udarne metamorfoze uvrščamo med hondrite, ki so bili izpostavljeni šibki udarni metamorfozi (S3 hondrit). Bischoff et al. (BISCHOFF et al., 2011) med drugim tudi ugotavljajo, da je kemična sestava olivina v meteoritu Jesenice homogena. Ugotovili so, da olivin povprečno vsebuje  $25,1 \pm 0,4$  mol.% fayalita. Sestava pa niha med vrednostmi 23,9 in 25,8 mol.% fayalita, kar ustreza sestavi navadnih hondritov z nizko vsebnostjo železa (OC L hondritom). Meteorit Jesenice je zato glede na veljavno klasifikacijo meteoritov hondritov klasificiran kot OC L6 S3 hondrit. Če povzamemo, bi lahko meteorit Jesenice opredelili kot nediferenciran kamnit meteorit, ki spada v razred hondritov, skupino navadnih hondritov, podskupino L hondritov, ki je

bil šibko metamorfoziran ter je šibko preperel (BISCHOFF et al., 2011).

### Zahvala

Avtorji bi se radi zahvalili obema recenzentoma, doc. dr. Mateji Gosar in Juretu Atanackovu, za popravke in komentar k vsebini članka. Brez njune pomoči bi bila vsebina članka okrnjena in ne bi dosegla svojega namena.

### Literatura

- ATANACKOV, J., JERŠEK, M., KAC, J., KLADNIK, G. & MIRTIC, B. 2010: Meteorit z Mežakle. In: KANOBELJ T (eds): Meteorit z Mežakle. Gornjesavski muzej in Prirodoslovni muzej Slovenije: 7-28.
- BISCHOFF, A., HORSTMANN, M., PACK, A., LAUBENSTEIN, M. & HABERER, S. 2010: Asteroid 2008 TC<sub>3</sub> – Almahata Sitta: A spectacular breccia containing many different ureilitic and chondritic lithologies. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/10-11: 1638–1656, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01108.x.
- BISCHOFF, A., JERŠEK, M., GRAU, T., MIRTIC, B., OTT, U., KUČERA, J., HORSTMANN, M., LAUBENSTEIN, M., HERMANN, S., ŘANDA, Z., WEBER, M. & HEUSSER, G. 2011: Jesenice – A new meteorite fall from Slovenia. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/6: 793–804, doi:10.1111/j.1945-5100.2011.01191.x.
- CURK, U. 2009: Mineralogija navadnih hondritov. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnoteniška fakulteta, Oddelek za geologijo 149. str.
- GOUNELLE, M., SPURNÝ, P., & BLAND, A. P. 1997: The orbit and atmospheric trajectory of the Orgueil meteorite from historical records. *Meteoritics & Planetary Science*, 44/1: 135-150.
- GRESHAKE, A., BISCHOFF, A. & PUTNIS, A. 1997: Transmission electron microscope study of compact Type A calcium-aluminium-rich inclusions from CV3 chondrites: Clues to their origin. *Meteoritics & Planetary Science*, 33/1: 75-87.
- GRESHAKE, A., WOLFGANG, K., ARNDT, P., MAETZ, M., FLYNN, G. J. & BISCHOFF, A. 1998: Heating experiments simulating atmospheric entry heating of micrometeorites: Clues to parent body sources. *Meteoritics & Planetary Science*, 33/2: 267-290.
- HARVEY, R. P., BENNET, M. L. & MCSWEEN, H. Y. 1993: Pyroxene equilibration temperatures in metamorphosed ordinary chondrites. *Lunar and Planetary Inst., Twenty-Fourth Lunar and Planetary Science Conference*, 615-616.
- HORSTMANN, M., BISCHOFF, A., PACK, A. & LAUBENSTEIN, M. 2010: Almahata Sitta-Fragment MS-CH. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/10-11: 1657-1667, doi: 10.1111/j.1945-5100.2010.01107.x.
- JANOTS, E., GNOSE, E., HOFMANN B. A., GREENWOOD, R. C., FRANCH, I. A. & BISCHOFF, A. 2011: Jiddat al Harasis 422: A ureilite with an extremely



- high degree of shock melting. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/1: 134–148.
- JONES, R. H. 1996: FeO-rich, porphyritic pyroxene chondrules in unequilibrated ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60/16: 3115–3138.
- KEIL, K. & BISCHOFF, A. 2008: Northwest Africa 2526: A partial melt residue of enstatite chondrite parentage. *Meteoritics & Planetary Science*, 43/7: 1233–1240.
- LAURETTA, D.S., MCSWEEN, H.Y. 2006: Petrology and Origin of Ferromagnesian Silicate Chondrules. In: LAURETTA D.S. et al. (eds.): *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 431–459.
- LENART, A., JERŠEK, M., MIRTČ, B. & ŠTURM, S. 2010: Meteorite Jesenice: mineral and chemical composition of the fusion crust of ordinary chondrite = Meteorit Jesenice: Mineralno-kemijska sestava žgalne skorje navadnega hondrita. *Geologija*, 53/ 2: 139–146, doi: 10.5474/geologija.2010.011.
- LLORCA, J., CASANOVA, I., PACK, A., TRIGO-RODRÍGUEZ, J., MAIDEO, J., BISCHOFF, A., OTT, U., FRANCH, I. A., GREENWOOD, R. C. & LAUBENSTEIN, M. 2009: The Puerto Lápice eucrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 44/2: 159–174.
- MILER, M. & GOSAR, M. 2011: Mineral and chemical composition of the new iron meteorite Javorje from Slovenia. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/12: 1939–1946, doi:10.1111/j.1945-5100.2011.01291.x.
- MILER, M. & GOSAR, M. 2012: Dve leti raziskav meteorita Javorje = Two years of the Javorje meteorite investigations. *Geologija*, 55/1: 5–16, doi:10.5474/geologija.2012.001.
- NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A., BOTTKE, W. A., GLADMAN, B. & HÄGGSTRÖM, T. 2007: Express delivery of fossil meteorites from the inner asteroid belt to Sweden. *Icarus*, 188/2: 400–413, doi:10.1016/j.icarus.2006.11.021.
- NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A. & BOTTKE, W. A. 2008: Asteroidal source of L chondrite meteorites. *Icarus*, 200/2: 698–701, doi:10.1016/j.icarus.2009.12.016.
- NORTON, R. 2002: *The Cambridge Encyclopedia of the Meteorites*. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge: 354 p.
- PRIOR, G. T. 1916: On the genetic relationship and classification of meteorites. *The Mineralogical Magazine*, 18: 26–44.
- RAMBALDI, E. R. 1981: Relict grains in chondrules. *Nature*, 293: 558–561.
- SEARS, D. 2004: *The Origin of Chondrules and Chondrites*. Cambridge University Press: 209 p.
- SEPP, B., BISCHOFF, A. & BOSBACH, D. 2001: Low-temperature phase decomposition in iron-nickel metal of the Portales Valley meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, 36/5: 587–595.
- SOKOL, A., & BISCHOFF, A. 2005: Meteorites from Botswana. *Meteoritics & Planetary Science*, 40/9: A177–A184.
- SOKOL, A., BISCHOFF, A., MARHAS, K. K., MEZENGER, K & ZINNER, E. 2007: Late accretion and lithification of chondritic parent bodies: Mg isotope studies on fragments from primitive chondrites and chondritic breccias. *Meteoritics & Planetary Science*, 42/7: 1291–1308.
- SPURNÝ, P., BOROVIČKA, A., J., KAC, J., KALENDA, P., ATANACKOV, J., KLADNIK, G., HEINLEIN, D & GRAU, T. 2010: Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/8: 1392–1407, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01121.
- STÖFFLER, D., KEIL, K. & SCOTT, E. R. D. 1991: Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 55/12: 3845–3867, doi:10.1016/0016-7037(91)90078-J.
- ŠMIT, Ž., JEZERŠEK, D., PELICON, P., VAVPETIČ, P., JERŠEK, M. & MIRTČ, B. 2011: Analysis of a chondrite meteorite from Slovenia. X-ray spectrum: 40/3: 205–209, doi:10.1002/xrs.1307.
- VAN SCHMUS, W. R., RIBBE, P. H. 1993: The composition and structural state of feldspar from chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57/12: 1327–1342.
- VOGEL, N., BAUR, H., BISCHOFF, A., LEYA, A. & WIELER, R. 2004: Noble gas studies in CA1 from CV3 chondrites: No evidence for primordial noble gases. *Meteoritics & Planetary Science*, 39/5: 767–778, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01161.x.
- VOGEL, N., RAINER, W., BISCHOFF, A & BAUR, H. 2003: Microdistribution of primordial Ne and Ar in fine grained rims, matrices, and dark inclusions of unequilibrated chondrites – clues on nebular processes. *Meteoritics & Planetary Science*, 38/9: 1399–1418.
- WEISBERG, M. K., MCCOY, T. J. & KROT, A. N. 2006: Systematics and Evolution of Meteorite classification. In: LAURETTA, D. S., & MCSWEEN, H. Y. (eds.): *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 19–52.
- WLOTZKA, F. A. 1993: Weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28/3: 460–460.
- Internet 1: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (31. 8. 2012) Vogel
- Internet 2: <http://www.meteoritelab.com/meteorites/meteorite-classification.php> (18. 5. 2012)