

Dve leti raziskav meteorita Javorje

Two years of the Javorje meteorite investigations

Miloš MILER & Mateja GOSAR

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, Slovenija;
e-mail: milos.miler@geo-zs.si; mateja.gosar@geo-zs.si

Prejeto / Received 14. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 30. 3. 2012; Dostopno na internetu / Available online 8. 5. 2012

Ključne besede: železov meteorit Javorje, srednji oktaedrit IIIAB, SEM/EDS analiza, mineralna in kemijska sestava, hitrost ohlajanja, Poljanska dolina, Slovenija

Key words: iron meteorite Javorje, medium octahedrite IIIAB, SEM/EDS analysis, mineral and chemical composition, cooling rate, Poljane Valley, Slovenia

Izvleček

Meteorit Javorje je železov meteorit, natančneje srednji oktaedrit iz kemijske skupine železovih meteoritov z oznako IIIAB s 7,83-odstotno vsebnostjo niklja. Najden je bil novembra 2009 blizu Javorij v Poljanski dolini. S skoraj petimi kilogrami predstavlja največji in najtežji meteorit, kar so jih doslej našli na ozemlju Slovenije. Namen članka je predstaviti glavne značilnosti meteorita Javorje tudi slovenski geološki javnosti. V članku so povzeti rezultati že objavljene raziskave tega meteorita, dodane pa so nekatere novejšje ugotovitve in podrobnosti o glavnih, akcesornih in sekundarnih mineralih ter o hitrosti ohlajanja.

Abstract

Meteorite Javorje is a IIIAB medium octahedrite iron meteorite with 7.83 wt% Ni content. It was found in November 2009 near village Javorje in the Poljane Valley. With nearly five kilograms it represents the largest and heaviest meteorite found so far in the territory of Slovenia. The purpose of this paper is to present general characteristics of meteorite Javorje to the slovenian geological community. This paper reviews results of already published research of this meteorite and provides some newer findings and details about major, accessory and secondary minerals, and also its cooling rate.

Uvod

Meteorit Javorje je s skoraj petimi kilogrami največji in najtežji meteorit izmed doslej najdenih na ozemlju Slovenije, in prav je, da o izsledkih raziskav tega zanimivega predmeta seznanjamo tudi bralce Geologije, osrednje slovenske geološke znanstvene revije. Pred dobrima dvema letoma je v bližini Javorij nad Poljansko dolino, zahodno od Škofje Loke, Vladimir Štibelj povsem po naključju odkril meteorit, ki poleg železovega meteorita Avče in kamnitega meteorita Jesenice, predstavlja tretji meteorit najden na ozemlju Slovenije. Pri gradnji gozdne ceste je pozornost najditelja v novo skopanem cestnem useku na globini 65–70 cm pritegnila nenavadna gmota, ki se je po svojem videzu razlikovala od kamnine in tal v kateri je ležala. Ko jo je vzel v roke, je ugotovil, da je nenavadno težka. V trenutku je bil prepričan, da je našel izjemno najdbo in domneval, da je najdeni predmet meteorit. Domnevni meteorit je skrbno shranil ter o najdbi obvestil v Poljanski dolini dobro znanega geologa, nek-

danjega sodelavca Rudnika urana Žirovski vrh, Pavla A. Florjančiča. Skupaj sta ugotovila, da je kos kovinski in da močno privlači magnet. Seveda pa tudi Pavle A. Florjančič ni mogel brez analiz potrditi, da je najdba res meteorit. Zato sta za pomoč prosila raziskovalce Geološkega zavoda Slovenije. Raziskave domnevnega meteorita so nam predstavljale velik raziskovalni izziv, saj se do takrat z materialom iz vesolja še nismo srečali. Ko so preliminarne analize z vrstičnim elektronskim mikroskopom v kombinaciji z energijsko disperzijskim spektrometrom (SEM/EDS) pokazale, da gre res za železov meteorit, smo se poglobljeno lotili raziskav. Sledile so natančne kemijske analize glavnih in slednih prvin ter določitev mineralne sestave in strukture. Vse te analize so namreč potrebne za natančno opredelitev in potrditev meteorita. Zbrane podatke smo januarja 2011 posredovali mednarodnemu Meteoritskemu društvu (The Meteoritical Society; <http://www.meteoriticalsociety.org/>), ki ureja podatkovno zbirko meteoritov in izdaja Meteoritski bilten (Meteoritical Bulletin, <http://www.lpi.usra>).

edu/meteor/metbull.php). Obravnavani predmet je bil kot meteorit Javorje uvrščen v meteoritsko podatkovno zbirko že 22. februarja 2011. V tej zbirki (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/>), ki ima prost dostop, si je mogoče ogledati osnovne podatke o vseh preiskanih meteoritih. Podrobneje pa so značilnosti meteorita Javorje opisane v članku »Mineral and chemical composition of the new iron meteorite Javorje from Slovenia« (MILER & GOSAR, 2011), ki je bil objavljen decembra 2011 v reviji *Meteoritics & Planetary Science*.

V pričujočem prispevku bralce uvodoma seznanjamo z osnovnimi podatki o meteoritih s poudarkom na železovih meteoritih. Sledi predstavitev značilnosti meteorita Javorje, tem pa so dodani še podrobnejši in bolj specifični rezultati mineraloških raziskav, ki smo jih opravili s SEM/EDS na Geološkem zavodu Slovenije. Na koncu pa sledi poglavje o hitrosti ohlajanja železovih meteoritov, v katerem je podana ocena hitrosti ohlajanja meteorita Javorje na podlagi vsebnosti Ni v sredini letvic taenita.

Meteoriti

Meteoriti so predmeti, ki padejo na Zemljino površje iz vesolja (LEWIS, 2004; CARDARELLI, 2008). Večina meteoritov, ki pade na Zemljo, prihaja iz glavnega asteroidnega pasu med orbitama Marsa in Jupitra, kjer je gostota asteroidov relativno velika (LEWIS, 2004). Večinoma so to fragmenti asteroidov, ki so zaradi močnih medsebojnih trkov v asteroidnem pasu razpadli. Ti delci krožijo okoli Sonca tudi več milijonov let, nato pa zaradi sprememb v njihovih orbitah, ki jih povzročijo orbitalne resonance z večjimi planeti, kot je Jupiter, lahko pristanejo na različnih planetih (LEWIS, 2004; ATANACKOV et al., 2010). Izmed vseh na Zemljo padlih meteoritov pa so med najredkejšimi tisti, ki izvirajo z Lune in Marsa (LEWIS, 2004).

Po kemijski in mineralni sestavi ter načinu nastanka se meteoriti delijo na tri večje skupine, **kamnite**, ki jih gradijo večinoma kamnintovorni silikatni minerali, **železove**, ki jih sestavljajo železovo-nikljevi minerali ter **kamnito-železove** meteorite, ki so mešanica silikatov in železovo-nikljevih mineralov (NORTON, 2002; MAURETTE, 2006; CARDARELLI, 2008). Med vsemi doslej znanimi in preiskanimi meteoriti ločimo tiste, katerih padec je bil opazovan in so bili takoj zatem tudi najdeni, to so t.i. padci (ang. falls), ter tiste, katerih čas padca ni znan in so bili najdeni po naključju, t.i. najdbe (ang. finds) (NORTON, 2002).

Kamniti meteoriti so najštevilčnejša skupina med vsemi padci in najdbami skupaj, saj predstavljajo kar 69 % vseh preiskanih meteoritov. Med kamnite meteorite, ki jih v tem prispevku ne bomo podrobneje obravnavali, sodi tudi slovenski meteorit Jesenice (navaden hondrit, tip L6), katerega padec so opazovali 9. aprila 2009. Na območju Mežakle so kasneje našli tri fragmente tega meteorita: prvega 17. maja 2009 (2290 g, najditelja Jožef Pretnar in Bojana Krajnc), drugega 21. julija (361 g, najditelja Ralph Sporn in Mar-

tin Neuhofer) in tretjega 27. avgusta 2009 (956 g, najditelj Danijel Repe) (BISCHOFF et al., 2011). Kamnitim meteoritom po pogostosti sledijo železovi meteoriti z 28 % ter kamnito-železovi meteoriti, ki jih je le okoli 3 % med vsemi znanimi meteoriti (NORTON, 2002). Večina meteoritov je na Zemljinem površju razmeroma neobstoje in zaradi izpostavljenosti mehanskim, kemičnim in biološkim vplivom relativno hitro preperevajo (NORTON, 2002).

Večina železovih meteoritov predstavlja fragmente kovinskih jeder večjih gravitacijsko diferenciranih matičnih teles, asteroidov, ki so se zaradi svoje velikosti dovolj segreli, da so težji elementi pod vplivom gravitacije potonili proti jedru, lažji pa so ostali v plašču (NORTON, 2002). Nekateri železovi meteoriti pa so nastali iz delno diferencirane taline, ki se je tvorila pri trkih nediferenciranih matičnih teles (HAACK & MCCOY, 2004). Železovi meteoriti so tako sestavljeni pretežno iz zlitin železa in niklja, ki tvorijo dva glavna minerala: **kamacit** z nižjo vsebnostjo niklja (5,4–7,5 mas%) in **taenit** z višjo vsebnostjo niklja (25–65 mas%) (BUCHWALD, 1977). Kristali teh mineralov gradijo v notranjosti meteorita posebne strukture, ki so značilne za železove meteorite. Na osnovi teh notranjih struktur oziroma urejenosti kristalov železovo-nikljevih mineralov in glede na njihovo kemijsko sestavo železove meteorite razvrščamo v skupine. Po notranji strukturi ločimo heksaedrite, oktaedrite in ataksite (ANDERS, 1964; NORTON, 2002; GOLDSTEIN et al., 2009).

Heksaedriti imajo nizko vsebnost niklja (4,5–6,5 mas%), zato jih večinoma gradi samo kamacit, ki kristali v obliki kocke oziroma heksaedra, po katerem se skupina tudi imenuje (NORTON, 2002; NORTON & CHITWOOD, 2008). Običajno so heksaedriti iz enega samega velikega kristala kamacita, v katerem so po jedkanju s kislino razločno opazne goste, vzporedne Neumannove črte. Te nastanejo v kamacitu zaradi strukturnih deformacij kristalov kamacita, ki so najverjetneje posledica trkov manjših ali večjih teles z matičnim telesom meteorita (NORTON, 1998). Med heksaedrite sodi tudi prvi meteorit, ki so ga našli na ozemlju Slovenije. To je 1230 g težak meteorit Avče, katerega padec so zabeležili 31. marca 1908 v bližini vasi Avče v Soški dolini. Po spodaj opisani kemijski klasifikaciji sodi meteorit Avče v skupino IIAB (Božič, 2008).

Oktaedriti so najštevilčnejši strukturni razred železovih meteoritov. Imajo višjo vsebnost niklja (6,5–12,7 mas%) kot heksaedriti, zato jih gradiata oba minerala, kamacit in taenit (LEWIS, 2004; NORTON & CHITWOOD, 2008). Nastopata v obliki izmeničnih pasov ploščicastih kristalov kamacita, ki so prostorsko urejeni v obliki oktaedra, in tankih letvic taenita (NORTON, 2002). Vmesne prostore med kristali zapolnjuje drobnozrnata osnova oziroma mešanica kamacita in taenita imenovana plezit (GOLDSTEIN et al., 2009). Kristali kamacita lahko nastanejo le pri izjemno počasnem ohlajanju (nekaj sto stopinj Celzija na milijon let) iz trdne raztopine železa in niklja, večinoma v je-

drih matičnih asteroidov. Na polirani in s kislino jedkani površini oktaedrita pasovi kamacita in taenita tvorijo t.i. Widmanstättenove vzorce, ki nastanejo zaradi izbirnega raztapljanja manj odpornega kamacita. Glede na širino teh pasov se oktaedriti nadalje delijo v pet podrazredov od najbolj debelozrnatih do najbolj drobnozrnatih oktaedritov. Debelozrnati oktaedriti so se v primerjavi z drobnozrnatimi oktaedriti ohlajali precej počasneje, zato so pasovi kamacita in taenita v njih širši od pasov pri drobnozrnatih oktaedritih (NORTON, 2002). Med srednjezrnate oktaedrite sodi tudi v tem prispevku obravnavani meteorit Javorje, o katerem bomo več napisali v nadaljevanju.

Ataksiti so najredkejša strukturna skupina železovih meteoritov. Vsebujejo največ niklja (> 16 mas%) med vsemi železovimi meteoriti in so sestavljeni skoraj samo iz minerala taenita z redkimi mikroskopskimi letvicami kamacita, zato nimajo izražene notranje strukture (NORTON & CHITWOOD, 2008).

Po modernejši, kemijski klasifikaciji se železovi meteoriti združujejo v 14 kemijskih skupin na podlagi vsebnosti niklja ter nekaterih lahkih in siderofilnih slednih prvin, kot so galij, germanij in iridij. Označujemo jih z rimskimi številkami in črkami. V splošnem velja, da imajo višje skupine nižjo vsebnost slednih prvin, nižje skupine pa višjo (LOVERING et al., 1957). Vsaka kemijska skupina naj bi odgovarjala posameznemu matičnemu telesu oz. asteroidu, saj železovi meteoriti s podobno kemijsko sestavo najverjetneje izvirajo iz istega matičnega asteroida (BUCHWALD, 1975; SCOTT & WASSON, 1975; HAACK & MCCOY, 2004; GOLDSTEIN et al., 2009). Ker so trendi v vsebnostih slednih prvin znotraj posameznih skupin lahko zelo različni, se skupine nadalje delijo v dva različna tipa; magmatski in ne-magmatski (WASSON, 1985). Železovi meteoriti magmatskega tipa so meteoriti, katerih nihanja vsebnosti slednih prvin so posledica kemijske frakcionacije slednih prvin pri frakcionirani kristalizaciji kovinske taline v jedrih diferenciranih asteroidov (SCOTT, 1972). Meteoriti magmatskega tipa tako večinoma vsebujejo le kovinsko fazo. Železovi meteoriti ne-magmatskega tipa pa najverjetneje izvirajo iz nediferenciranih matičnih teles, brez kovinskega jedra (HAACK & MCCOY, 2004), pri katerih je zaradi delnega nataljevanja ob trkih prišlo le do delne diferenciacije in nastanka posameznih železovih meteoritov (MITTFELDELT et al., 1998; BENEDIX et al., 2000; WASSON & KALLEMEYN, 2002). Posledično vsebujejo poleg kovinske tudi silikatno fazo (TAGLE et al., 2003).

Značilnosti meteorita Javorje

Makroskopski opis

Meteorit z Javorij (sl. 1) je podolgovate, približno trikotne oblike, z zaobljenimi robovi ter zunanji merami 15 × 12,5 × 11 cm in maso 4920 g. Površina meteorita je prekrita z debelo

rjavkasto skorjo produktov oksidacije železovo-nikljevih mineralov, še posebej na delu meteorita, ki je bil ob padcu delno zdrobljen. To kaže, da je bil meteorit izpostavljen različnim procesom prepevanja. Zaradi intenzivnega prepevanja so bile zabrisane tudi značilne vdolbinice oziroma regmaglipti in tanka žgalna skorja nataljene kovine, ki običajno nastanejo na površini meteorita zaradi taljenja in ablacije pri visokih temperaturah med njegovo potjo skozi atmosfero. Na podlagi visoke stopnje preperelosti lahko sklepamo, da je bil meteorit na Zemlji že dalj časa, vendar bodo njegovo zemeljsko starost predvidoma določile nadaljnje raziskave. Mestoma je možno že na prepereli površini meteorita prepoznati oktaedrično strukturo kristalov kamacita oziroma Widmanstättenove vzorce (MILER & GOSAR, 2011).

Kemijska sestava

Kemijska analiza 11 g svežega vzorca je bila opravljena v kemijskem laboratoriju ActLabs v Kanadi. Meteorit Javorje vsebuje 7,83 mas% Ni, 25 µg/g Ga, 47 µg/g Ge in 7,6 µg/g Ir (MILER & GOSAR, 2011). Kemijska sestava ostalih pomembnejših elementov v meteoritu Javorje je podana v članku MILERJA in GOSARJEVE (2011). Po kemijski klasifikaciji, podani v literaturi (HUTCHISON, 2004; MITTFELDELT, 2008), lahko na podlagi prej navedenih vsebnosti Ni, Ga, Ge in Ir uvrstimo meteorit Javorje med železove meteorite magmatskega tipa iz kemijske skupine IIIAB. Visoke vsebnosti Ga in Ge ter relativno nizka vsebnost Ni nakazujejo, da meteorit pripada IIIA delu omenjene kemijske skupine glede na podatke v literaturi (SCOTT & WASSON, 1975).



Sl. 1. Meteorit Javorje, prekrit z debelo skorjo produktov oksidacije. Merilo na sliki znaša 1 cm.

Fig. 1. Meteorite Javorje, covered with a thick crust of oxidation products. Scale bar is 1 cm.

Mineralna sestava

Za mineraloške analize smo od celotne mase meteorita odrezali 120,8 g težak trikotno oblikovani kos dimenzij 6,7 × 4,1 × 0,9 cm. Površini obeh strani odrezanega kosa smo v zaporednih

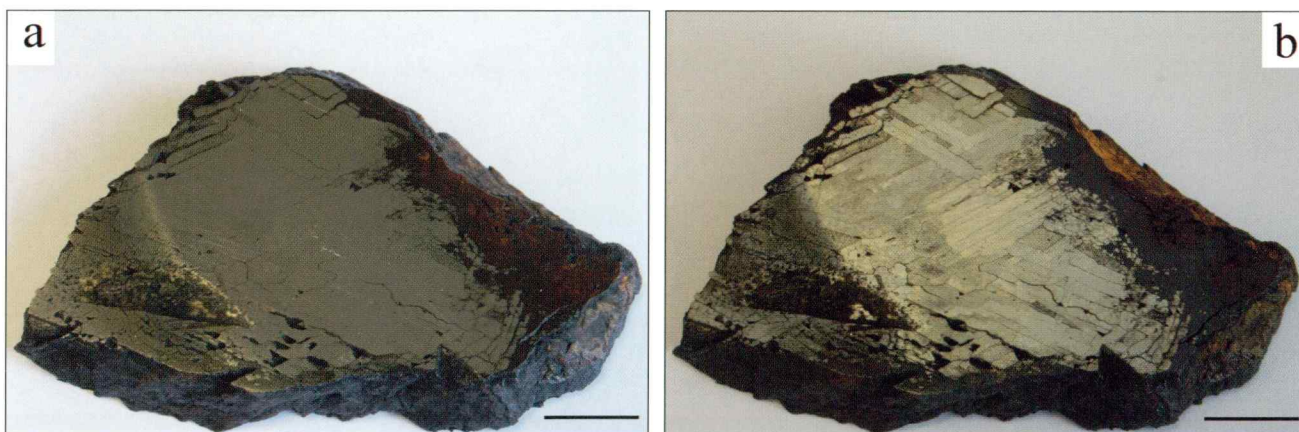
korakih zbrusili s karborundom frakcij 220, 600, 800 in 1000, nato pa ročno spolirali do zrcalnega sijaja z diamantno polirno suspenzijo frakcij 6 in 3 μm . Polirano površino na eni strani vzorca smo jedkali s 5 % raztopino nital (5 ml koncentrirane dušikove kisline in 95 ml brezvodnega etanola) po delno modificiranem postopku po NORTONU (2002).

Poliran obrus smo pregledali z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) JEOL JSM 6490LV v kombinaciji z energijsko disperzijskim spektrometrom (EDS) Oxford INCA Energy v laboratoriju Geološkega zavoda Slovenije. Vzorec je bil naparjen s tanko plastjo ogljika in pregledan v visokem vakuumu v načinu povratno sipanih elektronov (BSE). Kemijska sestava je bila izmerjena s semi-kvantitativno točkovno EDS analizo pri pospeševalni napetosti 20 kV, delovni razdalji 10 mm in časom zajema spektra 60 s. Mineralna sestava je bila ocenjena na podlagi atomskih razmerij sestavnih elementov. Sistem je bil optimiziran za kvantifikacijo s Co standardom, korekcije EDS podatkov pa so bile opravljene s standardno ZAF korekcijo, ki je vključena v programski opremi INCA Energy (OXFORD INSTRUMENTS, 2006).

SEM/EDS analiza poliranega vzorca je pokazala, da je meteorit pretežno sestavljen iz zlitin železa in niklja, ki tvorijo dva glavna minerala: kamacit in taenit. Nastopata v obliki izmeničnih pasov dolgih kristalov kamacita, prostorsko urejenih v obliki oktaedra, in tankih letvic taenita, ki so jasno vidni na polirani in s kislino jedkani površini kot t.i. Widmanstättenovi vzorci. Na slikah 2a, b je prikazana polirana površina pred in po jedkanju. Po jedkanju so Widmanstättenovi vzorci zelo jasno izraženi. Izmerjena povprečna širina pasov kamacita je $0,99 \pm 0,3 \text{ mm}$ ($N = 50$). Po uporabi popravka po metodi FROSTA (1965), je bila prava širina pasov kamacita ocenjena na $0,85 \pm 0,26 \text{ mm}$ (MILER & GOSAR, 2011). Glede na širino pasov kamacita uvrščamo meteorit Javorje med srednje oktaedrite. Pasovi kamacita imajo povprečno vsebnost niklja $7,1 \pm 0,4 \text{ mas\%}$ ($N = 24$). Kamacit se ponekod v vzorcu pojavlja tudi v obliki homogenih polj okrog večjih vključkov drugih mineralnih zrn, kot je troilit, ki po BRETTU in HEN-

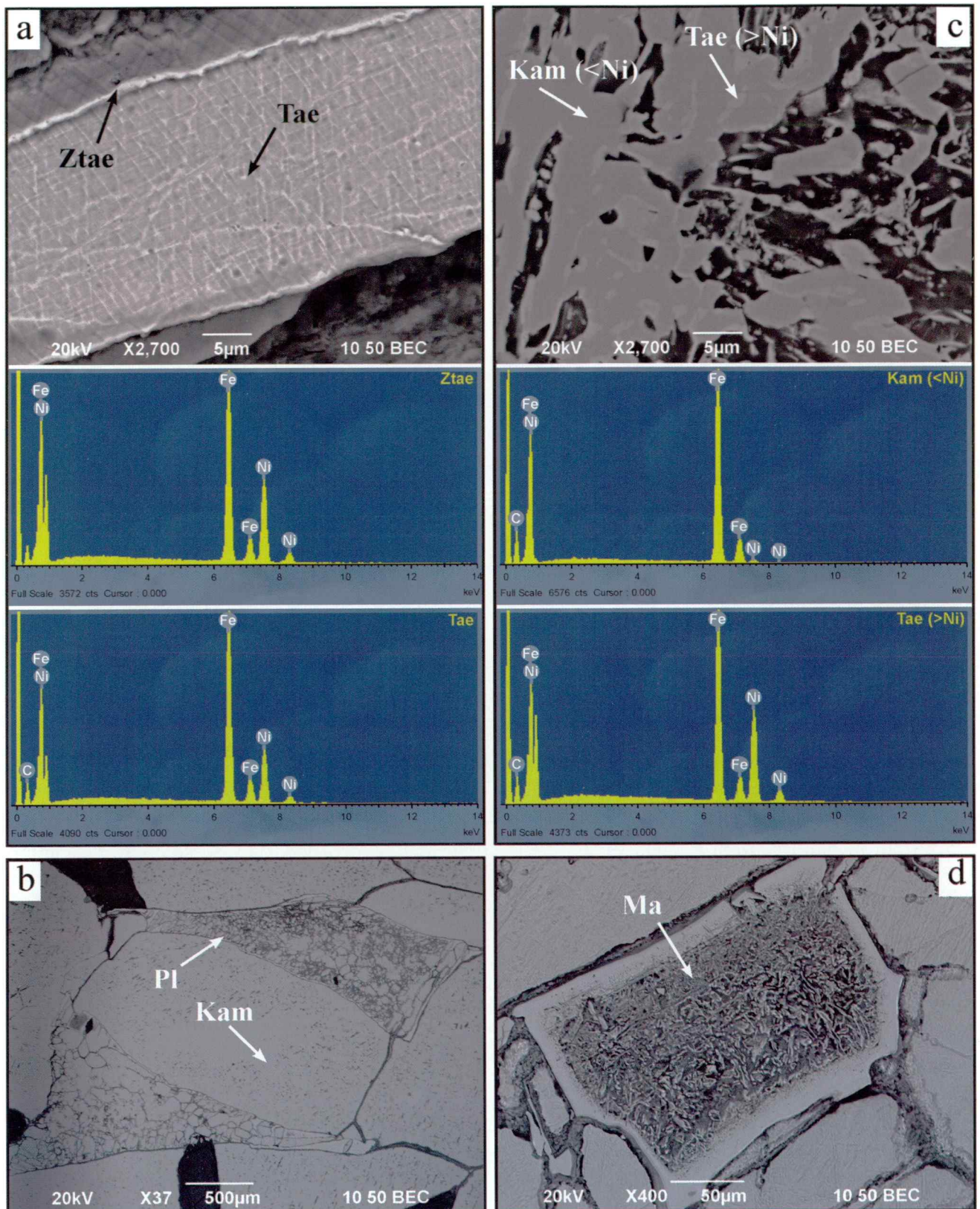
DERSONU (1967) običajno služijo kot kristalizacijska jedra za rast obdajajočega kamacita. Letvice taenita so široke povprečno 23 μm . Povprečna vsebnost Ni v srednjem delu teh letvic je $30,1 \pm 2,8 \text{ mas\%}$ ($N = 12$). Po jedkanju so se na zunanjih robovih letvic taenita, na meji s kamacitom, pokazale okrog 0,6 μm debele prevleke t.i. zunanjih taenitnih obrob (sl. 3a), ki vsebujejo povprečno $43,9 \pm 1,4 \text{ mas\% Ni}$. Vmesne prostore med kristali kamacita zapolnjuje drobnozrnata osnova oziroma mešanica kamacita in taenita imenovana plezit (sl. 3b). Plezit med kamacitnimi pasovi tvori relativno velika polja in se pojavlja v štirih teksturnih različicah, med katerimi sta najpogostejši satasta (sl. 3b) in mrežasta, medtem ko sta martenzitni plezit, sestavljen iz nizko-Ni kamacita in visoko-Ni taenita (sl. 3c, 3d), ter celični plezit manj pogosta (MILER & GOSAR, 2011).

V meteoritu Javorje smo določili še naslednje akcesorne in značilne minerale: železovo nikljev fosfid (schreibersit in njegov morfološki različek rhabdit), železovo kromov sulfid (daubréelit), železov sulfid (troilit), kromov nitrid (carlsbergit) in kromit (MILER & GOSAR, 2011). Rhabdit se pojavlja v obliki dolgih prizmatičnih in igličastih kristalov, ki so pravokotni eden na drugega in tvorijo mrežasto teksturo v kamacitu (sl. 4a). Schreibersit običajno nastopa v združbi z ostalimi akcesornimi minerali, kot sta daubréelit (sl. 4b) in troilit, na mejah med taenitom in kamacitom (sl. 4c) ter redko kot masivna posamezna zrna. Glede na podatke podane v literaturi (CLARKE & GOLDSTEIN, 1978; YANG & GOLDSTEIN, 2005) lahko sklepamo, da se je večina železovo nikljevih fosfidov v meteoritu Javorje najverjetneje izločila pri ohlajanju med 500 in 400 $^{\circ}\text{C}$, po nastanku Widmanstättenovih vzorcev, zaradi nasičenja kamacita ali taenita s P. Daubréelit nastopa kot posamezna masivna evhedralna zrna, obdana s tanko obrobo carlsbergita (sl. 4d), kot progasti daubréelit s tankimi letvicami troilita (sl. 5a) ter kot nepravilne letvice in žilice v zrnih troilita (sl. 5b), ki so se izločile pri razpadu trdne raztopine FeS in CrS. Masivni in progasti daubréelit sta pogosto v združbi s schreibersitom (sl. 4b). Nekatera zrna daubréelita so obrobljena tudi s kovinskim



Sl. 2. Površina polirane ploščice meteorita Javorje a) pred jedkanjem in b) po jedkanju. Po jedkanju so Widmanstättenovi vzorci zelo jasno izraženi. Merilo na sliki znaša 1 cm.

Fig. 2. Surface of polished slab of meteorite Javorje a) before etching and b) after etching. After etching, the Widmanstätten patterns are very distinct. Scale bar is 1 cm.



Sl. 3. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri glavnih mineralov in tekstur v meteoritu Javorje. a) Zunanje robove taenitnih letvic (Tae) sestavljajo t.i. zunanje taenitne obrobe (Ztae), ki so se pokazale po jedkanju. Iz spektrov, posnetih v točkah Ztae in Tae, je razvidno, da zunanje taenitne obrobe (Ztae) vsebujejo več Ni kot osrednji del taenitne letvice (Tae). b) Prostori med kristali kamacita (Kam) so zapolnjeni večinoma s satastim plezitom (Pl). c) Martenzitni pleziti je sestavljen iz nizko-Ni kamacita (Kam <Ni)) in visoko-Ni taenita (Tae >Ni)), kot je razvidno tudi iz spektrov pod SEM sliko. d) Martenzitni pleziti (Ma) po jedkanju. Vzorec je nparjen z ogljikom.

Fig. 3. SEM (BSE) images and EDS spectra of major minerals and structures in meteorite Javorje. a) Outer edges of taenite lamellae (Tae) are composed of outer taenite rims (Ztae), revealed after etching. Spectra taken at points Ztae and Tae show that outer taenite rims (Ztae) contain more Ni than the central part of taenite lamella (Tae). b) Spaces between kamacite crystals (Kam) are filled mostly by comb plessite (Pl). c) Martensitic plessite consists of low-Ni kamacite (Kam <Ni)) and high-Ni taenite (Tae >Ni)), as evident from the spectra below the SEM image. d) Martensitic plessite (Ma) after etching. Sample is coated with carbon.

Cu (sl. 5c), ki se je najverjetneje izločil po nastanku carlsbergita, ter z majhnimi subhedralnimi kristali dimenzij $3,1 \times 0,8 \mu\text{m}$ (sl. 5d). Ti kristali vsebujejo Co in relativno visoke vsebnosti Ni in S glede (sl. 5d) na sosednje minerale, ki so daubréelit in Fe-oksihidroksidi. Ker so kristali zelo majhni, najverjetneje večina Fe in O v spektru izvira iz Fe-oksihidroksidov, del Fe, S in Cr pa iz daubréelita kot posledica prekrivanja snopa elektronov. Kristali s Co, Ni in S so verjetno nastali pri procesih preperevanja kamacita, daubréelita in železovo nikljevih fosfidov. Glede na njihovo sestavo bi morda lahko šlo za sulfida siegenit ali willamaninit. Troilit je redek in se pojavlja kot veliki zaobljeni, podolgovati vključki (sl. 5b), obdani s homogenim kamacitom, kot posamezna zrna na mejah med pasovi kamacita in kot zelo tanke letvice v progastem daubréelitu (sl. 5a). Zrna troilita vsebujejo tudi manjše vsebnosti Cr kot posledica nepopolnega izločanja daubréelita iz trdne raztopine ali prisotnosti zelo tankih letvic daubréelita izločenih v troilitu (MILER & GOSAR, 2011). Carlsbergit v meteoritu Javorje nastopa kot submikronski evhedralni kristali (sl. 6a), ki obdajajo zrna masivnega daubréelita (sl. 4d). Na jedkani strani vzorca meteorita je bilo prepoznano subhedralno zrno dimenzij $12,7 \times 7,2 \mu\text{m}$ z relativno visokimi vsebnostmi Fe, Cr in N ter nizko vsebnostjo Ni (sl. 6b). Atomska razmerja sestavnih elementov, izmerjenih s semi-kvantitativno EDS analizo, so pokazala, da ima zrno sestavo (Fe,Cr)N, ki bi po ANTHONYJU in sodelavcih (2009) lahko odgovarjala carlsbergitu z manjšo vsebnostjo Fe. Faze s podobno sestavo nastajajo tudi v jeklih z visoko vsebnostjo N in so posledica raztapljanja dela Fe v kubičnem kromovem nitridu, medtem ko je topnost Ni zanemarljiva (GAVRI-LJUK & BERNIS, 1999). Kromit se pojavlja v združbi s troilitom in daubréelitom v enem samem velikem vključku, ki je sestavljen iz treh vzporednih plasti troilita, kromita in daubréelita. Ta združba mineralov je, upoštevajoč literaturne podatke (KRACHER, 1983; OLSEN et al., 1999), najverjetneje posledica oksidacije daubréelita med kristalizacijo jedra, pri čemer sta nastala kromit in troilit z ostanki prvotnega daubréelita.

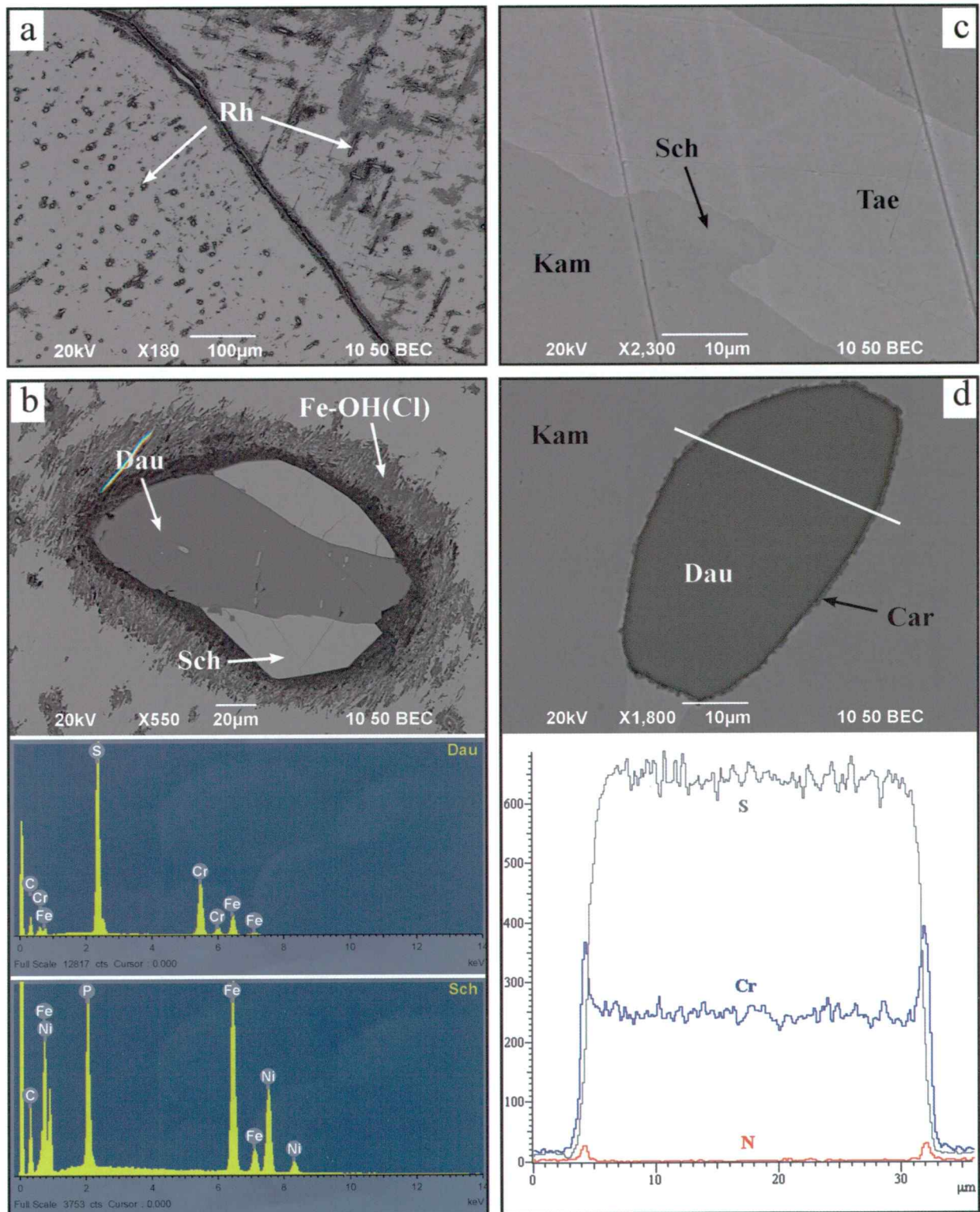
Kot posledica preperevanja v atmosferskih pogojih sta kamacit in taenit na površini ter vzdolž razpok in zrn mineralov v notranjosti meteorita, približno 2 do 3 cm pod površino, oksidirala v sekundarne Fe-oksihidrokside z manjšimi vsebnosti Ni (MILER & GOSAR, 2011). To so predvsem goethit in/ali lepidokrokrit ter s Cl bogat Fe-oksihidroksid akaganéit (sl. 7a). Akaganéit je prvi produkt oksidacije Fe-Ni mineralov (BUCHWALD & CLARKE, 1989) zato se pojavlja v razpokah ter okrog rhabdita (sl. 7b) in zrn daubréelita (sl. 4b) globoko v notranjosti meteorita, predvsem pa na čelu korozije v neposrednem stiku s svežim kamacitom (sl. 7c). Cl izvira iz talne vode in vstopa v proces oksidacije kamacita zaradi elektrokemijske narave procesa pri čemer se Cl veže na anionska izmenjalna mesta Fe-oksihidroksidov (BUCHWALD & CLARKE, 1989). Z oddaljenostjo od čela korozije akaganéit postopoma prehaja v

goethit in/ali lepidokrokrit (sl. 7a). Z napredujočo oksidacijo se namreč ioni Cl v akaganéitu popolnoma nadomestijo z $(\text{OH})^{-1}$ ioni zaradi česar akaganéit v celoti preide v čiste Fe-oksihidrokside (BUCHWALD & CLARKE, 1989). Prisotnost S v spektru čistih Fe-oksihidroksidov (sl. 7a) je verjetno posledica oksidacije sulfidnih mineralov.

Hitrost ohlajanja meteorita Javorje

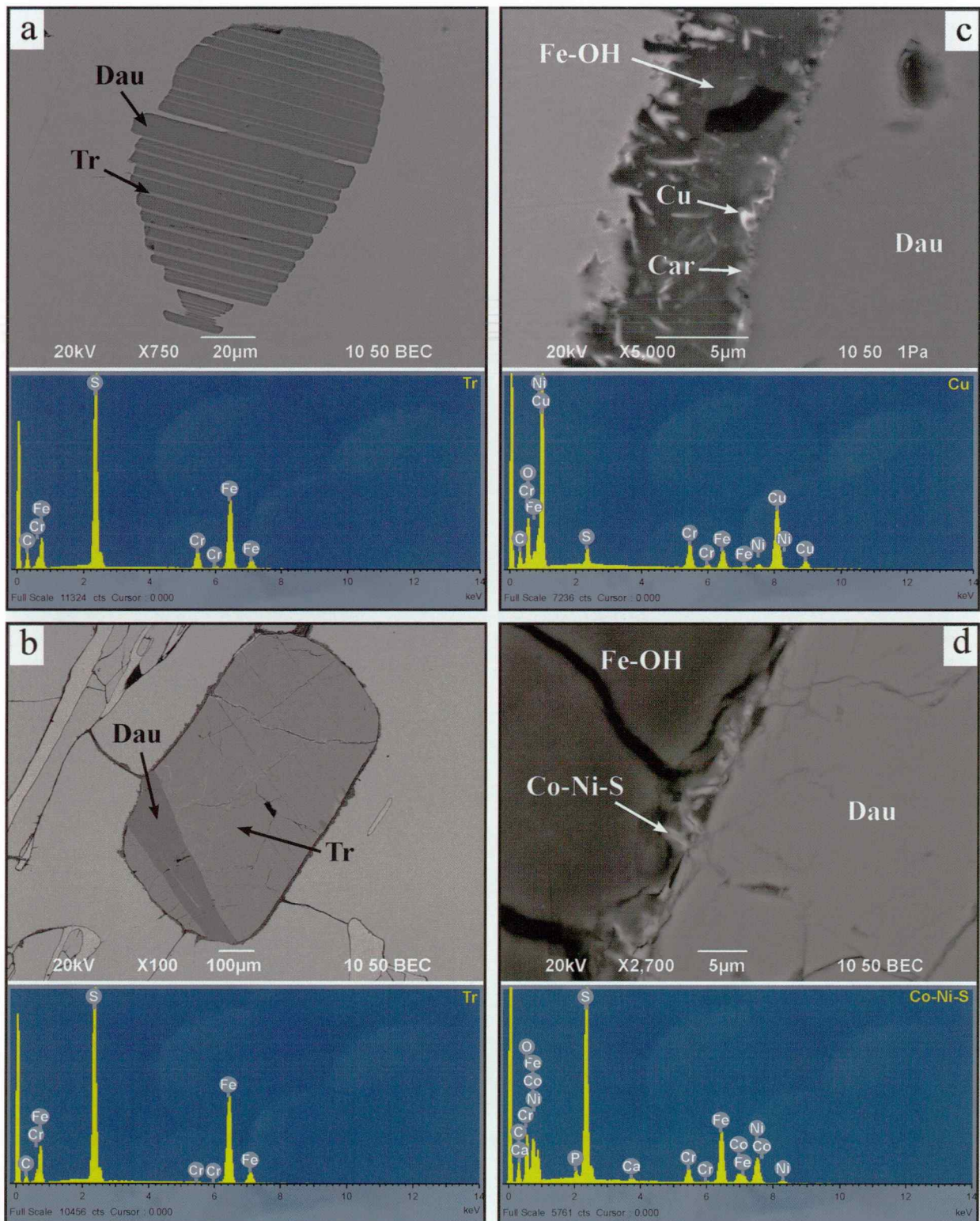
Hitrost ohlajanja železovih meteoritov daje informacije o njihovi termični zgodovini, ki so pomembne za določitev izvora meteoritov in za interpretacijo nastanka njihovega matičnega telesa. Prav tako omogoča oceno velikosti (NORTON, 2002) in zgradbe matičnega telesa; debeline silikatnega plašča in velikosti kovinskega jedra (YANG & GOLDSTEIN, 2006; GOLDSTEIN et al., 2009). Hitrost ohlajanja je značilna za vsako kemijsko skupino železovih meteoritov in se praviloma spreminja obratno sorazmerno z vsebnostjo Ni (YANG & GOLDSTEIN, 2006). Poleg značilnih razlik v hitrosti ohlajanja med kemijskimi skupinami so tudi znotraj posameznih skupin razponi v hitrosti ohlajanja precej veliki. Zelo veliki razponi so lahko posledica trkov velikih diferenciranih matičnih teles z drugimi večjimi telesi, pri čemer so prvotna matična telesa razpadla na več manjših, ki so se različno hitro ohlajala (YANG et al., 2008; GOLDSTEIN et al., 2009; YANG et al., 2010). Na podlagi hitrosti ohlajanja posameznega meteorita je možno oceniti, v katerem delu jedra matičnega telesa je le-ta nastal. Zunanji deli kovinskih jeder se namreč praviloma ohlajajo hitreje kot notranji deli jeder (MOSKOVITZ & WALKER, 2011). Izračunane hitrosti ohlajanja železovih meteoritov skupine IIIAB se gibljejo v razponu med 56–338 °C/mio let (YANG & GOLDSTEIN, 2006). Na podlagi teh podatkov so sklepali, da meteoriti skupine IIIAB najverjetneje izvirajo iz enega samega matičnega telesa s premerom med 40 in 60 km (HAACK et al., 1990), čeprav niso nastali v enem samem jedru. To pomeni, da je diferencirano matično telo pred razpadom verjetno doživelo več trkov z večjimi telesi, pri čemer se mu je na nekaterih delih velikost povečala zaradi dodajanja novega materiala na površini, na drugih delih pa je bil odstranjen večji del plašča in skorje.

Hitrost ohlajanja železovega meteorita Javorje je bila ocenjena iz korelacije med vsebnostjo Ni, izmerjene v sredini letvice taenita, in polovično širino letvice, pri kateri je bila upoštevana korekcija zaradi orientacije preseka. Povprečna centralna vsebnost Ni v petih izmerjenih letvicah taenita znaša 29,4 mas% in povprečna polovična širina letvice znaša 9,8 μm . Pri oceni hitrosti ohlajanja sta bili upoštevani tudi celokupni vsebnosti Ni (7,83 mas%) in P (0,12 mas%) v meteoritu. Na podlagi primerjave z rezultati meritev in izračuna hitrosti ohlajanja v meteoritih skupine IIIAB s podobnimi vsebnostmi Ni in P, ki sta jih dobila YANG in GOLDSTEIN (2006), je bila tako ocenjena hitrost ohlajanja meteorita Javorje med 50 in 180 °C/mio let. Ocenjena hitrost ohlajanja meteorita Javorje je znotraj razpona značilnega za skupino IIIAB



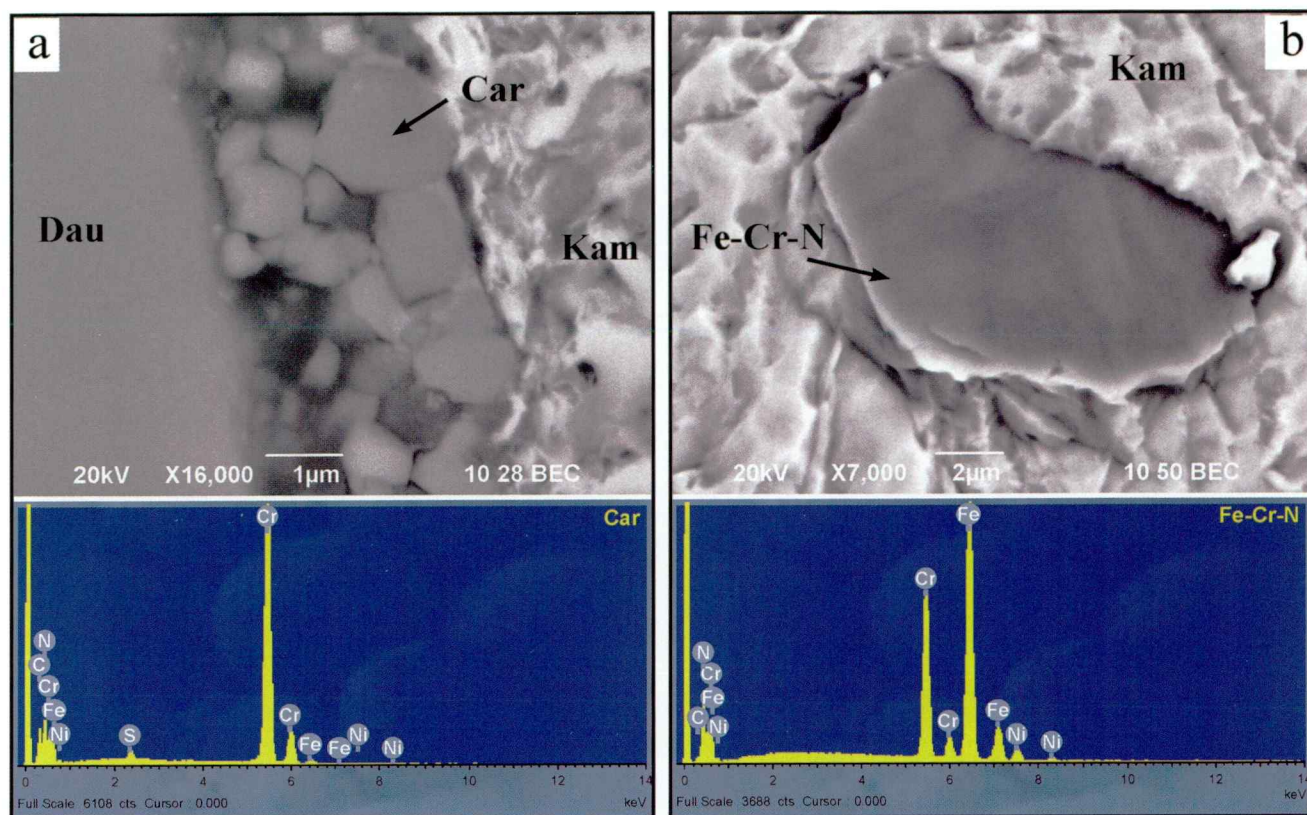
Sl. 4. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v meteoritu Javorje. a) Dolgi prizmatični in igličasti kristali rhabdita (Rh) so pravokotni eden na drugega in tvorijo mrežasto teksturo v kamacitu. b) Zrno daubréelita (Dau) v združitvi s schreibersitom (Sch). Kemijska sestava obeh mineralov je razvidna iz spektrov pod SEM sliko. Ob zrnu je kamacit oksidiral v sekundarni s Cl bogat Fe-oksihidroksid akaganéit (Fe-OH(Cl)). c) Schreibersit (Sch) na meji med kamacitom (Kam) in taenitom (Tae). d) Zrno daubréelita (Dau) v kamacitu (Kam) obdano s tanko plastjo carlsbergita (Car). Črta preko zrna označuje območje linijske EDS analize, ki je prikazana v grafu pod SEM sliko. Graf prikazuje spreminjanje relativne vsebnosti Cr, S in N preko analiziranega zrna. Vsebnosti Cr in N sta višji na robovih zrna, kar nakazuje prisotnost carlsbergita. Vzorec je naperjen z ogljikom.

Fig. 4. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in meteorite Javorje. a) Long prismatic and acicular rhabdite crystals (Rh) are perpendicular to each other and form net-like inclusions in kamacite. b) Daubréelite grain (Dau) associated with schreibersite (Sch). Chemical composition of both minerals is shown in spectra below the SEM image. Kamacite around daubréelite oxidised into secondary Cl-rich Fe-oxyhydroxide akaganéite (Fe-OH(Cl)). c) Schreibersite (Sch) at the boundary between kamacite (Kam) and taenite (Tae). d) Daubréelite grain (Dau) in kamacite (Kam) rimmed with a thin layer of carlsbergite (Car). Line on the image marks the area of EDS line analysis, which is shown in graph below the SEM image. Graph shows variations in relative contents of Cr, S and N across the analysed grain. Cr and N contents are much higher at the edges of daubréelite, which indicates presence of carlsbergite. Sample is coated with carbon.



Sl. 5. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v meteoritu Javorje. a) Progasti daubréelit (Dau) s tankimi letvicami troilita (Tr). Cr v spektru troilita (Tr) pod SEM sliko izvira iz okoliškega daubréelita. b) Troilit (Tr) z nepravilnimi letvicami in žilicami daubréelita (Dau). Cr v spektru troilita (Tr) pod SEM sliko je najverjetneje posledica nepopolnega izločanja daubréelita iz trdne raztopine FeS-CrS. c) Zrno daubréelita (Dau) obdano s carlsbergitom (Car), na katerem se je izločil kovinski Cu (Cu), ter Fe-oksihidroksidi (Fe-OH). Cr, Fe, Ni in S v spektru kovinskega Cu (Cu) izvirajo iz sosednjega daubréelita in Fe-oksihidroksidov. d) Zrno daubréelita (Dau) obdano s kristali, ki vsebujejo Co, Ni in S (Co-Ni-S) in Fe-oksihidroksidi (Fe-OH). Fe, Cr in O v spektru zrn s Co, Ni in S (Co-Ni-S) izvirajo iz sosednjega daubréelita in Fe-oksihidroksidov. Vzorec je naparjen z ogljikom.

Fig. 5. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in meteorite Javorje. a) Barred daubréelite (Dau) with thin troilite lamellae (Tr). Cr in the spectrum of troilite (Tr) below the SEM image originates from surrounding daubréelite. b) Troilite (Tr) with irregular lamellae and veinlets of daubréelite (Dau). Cr in the spectrum of troilite (Tr) below the SEM image results from incomplete exsolution of daubréelite from the FeS-CrS solid solution. c) Daubréelite grain (Dau) rimmed with carlsbergite (Car), onto which native Cu (Cu) precipitated, and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). Cr, Fe, Ni and S in the spectrum of native Cu (Cu) originate from the adjacent daubréelite and Fe-oxyhydroxides. d) Daubréelite grain (Dau) rimmed with crystals containing Co, Ni and S (Co-Ni-S) and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). Fe, Cr and O in the spectrum of Co-, Ni- and S-bearing grains originate from the adjacent daubréelite and Fe-oxyhydroxides. Sample is coated with carbon.



Sl. 6. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v jedkanem vzorcu meteorita Javorje. a) Detalj ehedralnih kristalov carlsbergita (Car) okrog daubréelita (Dau). Pod SEM sliko je spekter carlsbergita (Car), v katerem Fe, Ni in S najverjetneje izvirajo iz sosednjega daubréelita in kamacita (Kam). b) Zrno, ki vsebuje Fe, Cr in N (Fe-Cr-N), se je pokazalo v kamacitu (Kam) po jedkanju. Najverjetneje gre za carlsbergit z manjšo vsebnostjo Fe. Ni v spektru tega zrna (Fe-Cr-N) izvira iz okoliškega kamacita. Vzorec je neparjen z ogljikom.

Fig. 6. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in etched sample of meteorite Javorje. a) Detail of euhedral carlsbergite crystals (Car) around daubréelite (Dau). Spectrum of carlsbergite (Car) below the SEM image contains Fe, Ni and S, which probably originate from the adjacent daubréelite and kamacite (Kam). b) Grain, consisting of Fe, Cr and N (Fe-Cr-N), revealed in kamacite (Kam) after etching. It is most probably carlsbergite with lower content of Fe. Ni in the spectrum of this grain (Fe-Cr-N) results from the surrounding kamacite. Sample is coated with carbon.

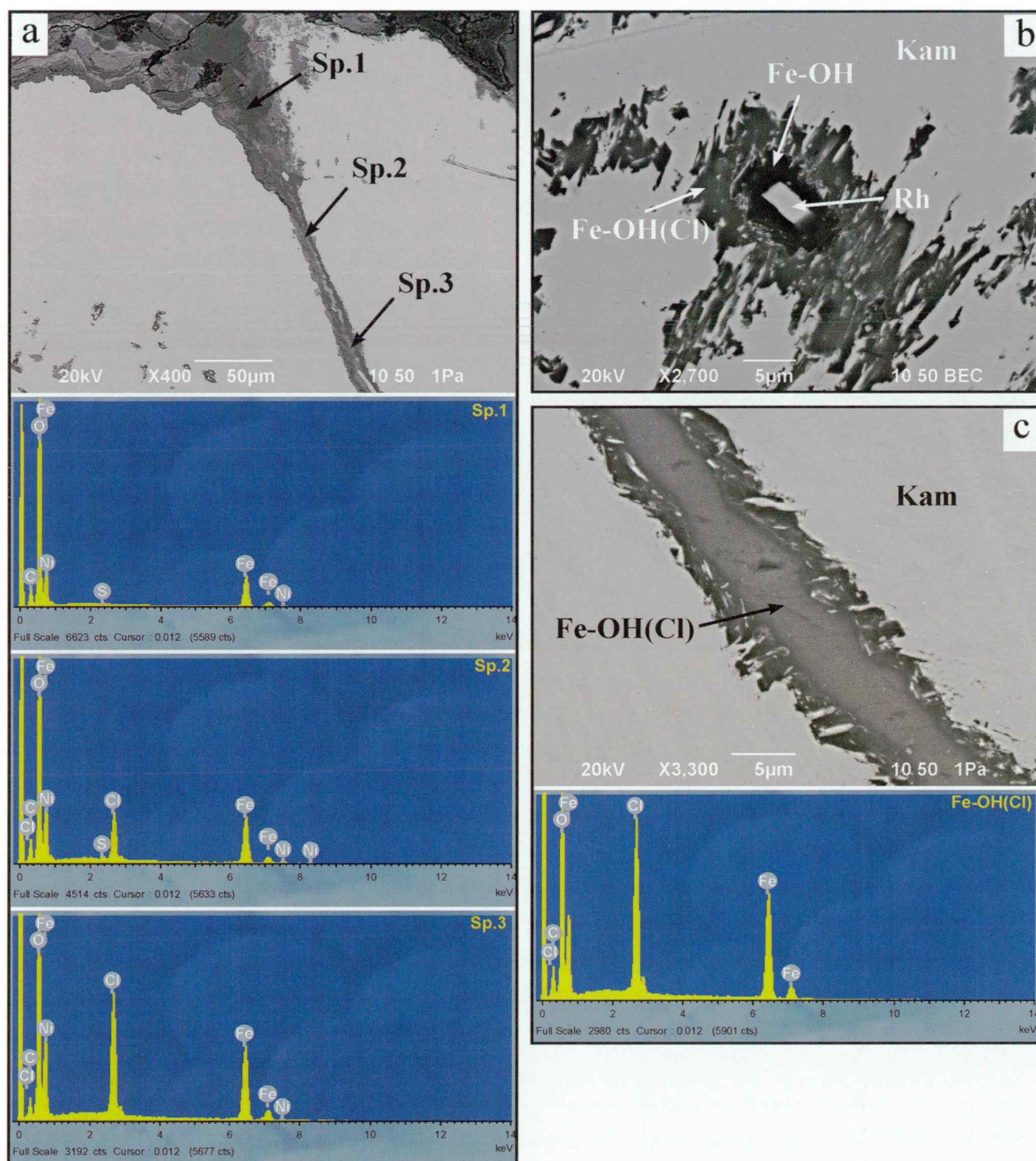
(YANG & GOLDSTEIN, 2006). V diagramu vsebnosti Ni v odvisnosti od razdalje (sl. 8a, b), izmerjene s semi-kvantitativno EDS analizo 30 točk v razmiku 1,08 µm preko letvice taenita, so opazne razlike v vsebnosti Ni med robovi in centralnim delom letvic taenita. Hitrost ohlajanja oz. kristalizacije namreč vpliva na difuzijo Ni v kamacitu in taenitu, kar se odraža v nehomogeni porazdelitvi Ni v letvicah taenita (NORTON, 2002). Glede na dano širino merjene letvice taenita je razlika v vsebnosti Ni relativno majhna in je v skladu z visoko stopnjo difuzije Ni v taenitu. Meteorit Javorje ima v primerjavi z drugimi meteoriti iz skupine IIIAB relativno visoke vsebnosti siderofilnih elementov z višjim tališčem od Fe, kot je Ir, in nizke vsebnosti elementov z nižjim tališčem od Fe, kot je Ni. Glede na vsebnosti Ir in Ni ter ocenjeno hitrost ohlajanja je meteorit Javorje najverjetneje nastal v zunanjem delu jedra matičnega telesa zgodaj v procesu njegove kristalizacije.

Po YANGU in GOLDSTEINU (2005) so Widmanstättenovi vzorci in pleziti v meteoritih skupine IIIAB, ki vsebujejo pod 8 mas% Ni in pod 0,3 mas% P, med katere sodi tudi meteorit Javorje, nastali z ohlajanjem s pretvorbo prvotnega visokotemperaturnega taenita preko vmesne faze z metastabilnim martenzitom in visoko-Ni taenitom v kamacit, nizkotemperaturni taenit in fos-

fide. Pri tem naj bi imel nizkotemperaturni taenit centralno vsebnost Ni podobno celokupni vsebnosti Ni v meteoritu, kamacit pa le nekoliko nižjo od celokupne vsebnosti Ni. Vendar pa so EDS meritve centralne vsebnosti Ni v letvicah taenita (sl. 8a, b) v meteoritu Javorje pokazale, da so le-te precej višje od vsebnosti Ni v sosednjem kamacitu in tudi višje od celokupne vsebnosti Ni v meteoritu. To pa nakazuje, da so strukture v meteoritu Javorje najverjetneje nastale s pretvorbo prvotnega visokotemperaturnega taenita preko metastabilne faze z martenzitno strukturo v kamacit, nizkotemperaturni taenit in fosfide. Tak način nastanka struktur potrjuje tudi povprečna vsebnost Ni v martenzitnih plezilih, ki je precej višja od celokupne vsebnosti v meteoritu (YANG & GOLDSTEIN, 2005).

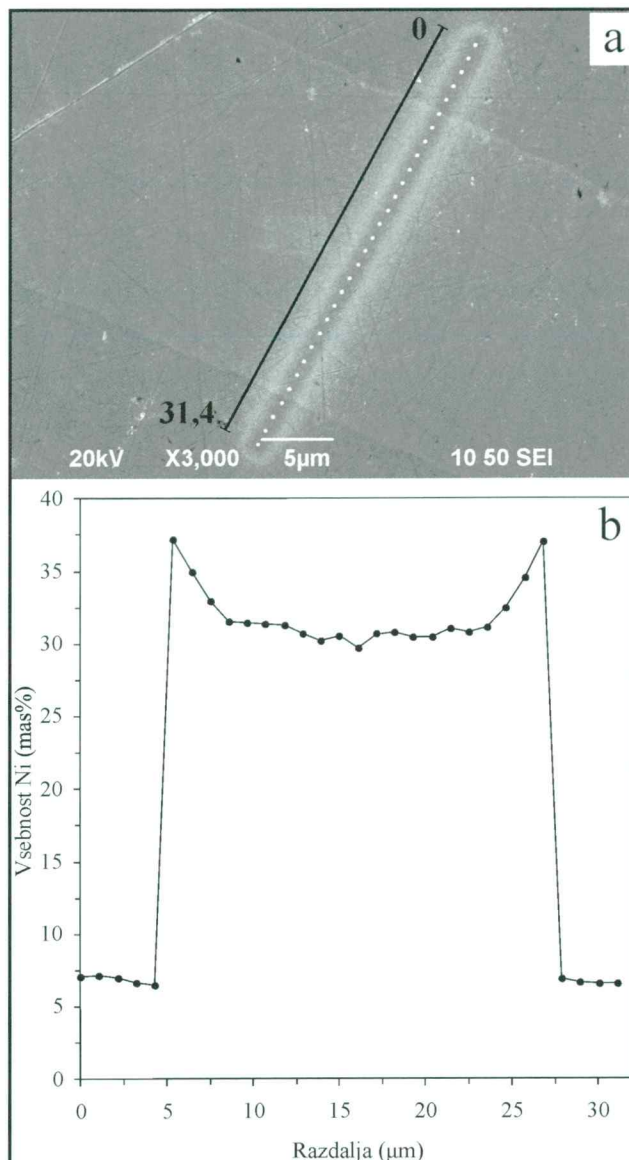
Zahvala

Raziskava je bila izvedena v okviru raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (P1-0020), ki ga financira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Avtorja se zahvaljujeta dr. Hassanu Neinavaui za koristne nasvete in tehničnemu sodelavcu GeoZS Mladenu Štumergarju za pomoč pri izdelavi poliranega obrusa.



Sl. 7. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri sekundarnih produktov preprevanja v meteoritu Javorje. a) Oksidacija je ob razpokah prodrla globoko v notranjost meteorita. Akaganéit (sp.3) z oddaljenostjo od čela korozije postopoma prehaja v Fe-oksihidrokside (sp.1). Prisotnost Ni in S v spektrih pod SEM sliko je posledica oksidacije sulfidov in Fe-Ni mineralov. b) Kamacit (Kam) okrog evhedralnega zrna prizmatičnega rhabdita (Rh) je oksidiral v akaganéit (Fe-OH(Cl)) ter Fe-oksihidrokside (Fe-OH). c) Detajl razpoke na čelu korozije. Razpoko zapolnjuje akaganéit (Fe-OH(Cl)), katerega kemijska sestava je prikazana v spektru pod SEM sliko. Vzorec je naparjen z ogljikom.

Fig. 7. SEM (BSE) images and EDS spectra of secondary weathering products in meteorite Javorje. a) Oxidation penetrated along the cracks deep into the interior of meteorite. Akaganéite (sp.3) gradually passes into Fe-oxyhydroxides (sp.1) with increasing distance from the corrosion front. Presence of Ni and S in spectra below the SEM image is a consequence of oxidation of sulphides and Fe-Ni minerals. b) Kamacite (Kam) around euhedral grain of prismatic rhabdite (Rh) oxidised into akaganéite (Fe-OH(Cl)) and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). c) Detail of a crack at the corrosion front. The crack is filled by akaganéite (Fe-OH(Cl)), whose chemical composition is shown in the spectrum below the SEM image. Sample is coated with carbon.



Sl. 8. a) SEM (SE) posnetek letvice taenita po opravljenih 30 točkovnih EDS meritvah preko letvice v dolžini 31,4 µm. b) V diagramu vsebnosti Ni v odvisnosti od razdalje so opazne razlike v vsebnosti Ni med robovi in centralnim delom letvice taenita. Centralna vsebnost Ni v letvici taenita je precej višja od vsebnosti Ni v sosednjem kamacitu.

Fig. 8. a) SEM (SE) image of taenite lamella after 30 point EDS analyses across the lamella, 31.4 µm in length. b) Graph of Ni content vs. distance shows distinct differences in Ni content between edges and central part of the taenite lamella. Central Ni content in taenite lamella is much higher than the Ni content in adjacent kamacite.

Literatura

- ANDERS, E. 1964: Origin, age, and composition of meteorites. *Space Science Reviews*, 3: 583-714.
- ANTHONY, J. W., BIDEAUX, R. A., BLADH, K. W. & NICHOLS, M. C. 2009: *The Handbook of Mineralogy* [online]. Mineralogical Society of America. Internet: <http://www.handbookofmineralogy.org/> (10. 3. 2012).
- ATANACKOV, J., JERŠEK, M., KAC, J., Kladnik, G. & MIRTič, B. 2010: Meteorit z Mežakle. V: KONOBE LJ, T. (ur.): Meteorit z Mežakle. Ministrstvo

- RS za kulturo, Ljubljana; Občina Jesenice; Občina Gorje: 7-14.
- BENEDIX, G. K., MCCOY, T. J., KEIL, K. & LOVE, S. G. 2000: A petrologic study of the IAB iron meteorites: Constraints on the formation of the IAB-winonaite parent body. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 1127-1141.
- BISCHOFF, A., JERŠEK, M., GRAU, T., MIRTič, B., OTT, U., KUČERA, J., HORSTMANN, M., LAUBENSTEIN, M., HERRMANN, S., RANDA, 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.
- BOŽIČ, D. 2008: Meteorit iz Avč. V: BOŽIČ, D. (ur.): Meteorit iz Avč v dolini Soče: 1908-2008. Prirodoslovni muzej Slovenije, Ljubljana; Športno-kulturno-turistično društvo, Avče: 17-19.
- BRETT, R. & HENDERSON, E. P. 1967: The occurrence of lamellar troilite in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31/5: 721-724.
- BUCHWALD, V. F. 1975: *Handbook of iron meteorites, I-III*. University of California Press, Berkeley: 1418 p.
- BUCHWALD, V. F. 1977: The mineralogy of iron meteorites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 286: 453-491.
- BUCHWALD, V. F. & CLARKE, R. S. Jr. 1989: Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite (FeO(OH,Cl)): The Antarctic meteorite case. *American Mineralogist*, 74: 656-667.
- CARDARELLI, F. 2008: *Materials handbook: a concise desktop reference*, 2. izdaja. Springer, London: 1340 p.
- CLARKE, R. S. Jr. & GOLDSTEIN, J. I. 1978: Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*, 21. Smithsonian Institution Press, Washington: 79 p.
- FROST, M. T. 1965: Kamacite plate width estimation in octahedrites. *Mineralogical Magazine*, 35: 640-642.
- GAVRILJUK, V. G. & BERNS, H. 1999: *High nitrogen steels: structure, properties, manufacture, applications*. Springer, Berlin-Heidelberg: 378 p.
- GOLDSTEIN, J. I., SCOTT, E. R. D. & CHABOT, N. L. 2009: Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Chemie der Erde*, 69: 293-325, doi:10.1016/j.chemer.2009.01.002.
- HAACK, H., RASMUSSEN, K. L. & WARREN, P. H. 1990: Effects of regolith/megaregolith insulation on the cooling histories of differentiated asteroids. *Journal of Geophysical Research*, 95: 5111-5124.
- HAACK, H. & MCCOY, T. J. 2004: Iron and stony-iron meteorites. V: DAVIS, A. M., HOLLAND, H. D. & TUREKIAN, K. I. (ur.): *Meteorites, Comets, and Planets, Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1: 325-345.
- HUTCHISON, R. 2004: *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge: 520 p.

- KRACHER, A. 1983: Notes on the evolution of the IIIAB/pallasite parent body (abstract). *Lunar and Planetary Science XIV*: 405-406.
- LEWIS, J. S. 2004: *Physics and chemistry of the Solar system*, 2. izdaja. Elsevier Academic Press, San Diego: 655 p.
- LOVERING, J. F., NICHIPORUK, W., CHODOS, A. & BROWN, H. 1957: The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 11: 263-278.
- MAURETTE, M. 2006: *Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins*. Springer, Berlin-Heidelberg: 330 p.
- 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.
- MITTFEHLDT, D. W. 2008: Appendix: Meteorites-A brief tutorial. V: MACPHERSON, G. J., MITTFEHLDT, D. W., & JONES, J. H. (ur.): *Oxygen in the solar system*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 68. Mineralogical Society of America, Chantilly: 571-590.
- MITTFEHLDT, D. W., MCCOY, T. J., GOODRICH, C. A. & KRACHER, A. 1998: Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. V: PAPIKE, J. J. (ur.): *Planetary Materials*. *Reviews in Mineralogy*, vol. 36. Mineralogical Society of America, Washington: 4-195.
- MOSKOVITZ, N. A. & WALKER, R. J. 2011: Size of the group IVA iron meteorite core: Constraints from the age and composition of Muonionalusta. *Earth and Planetary Science Letters*, 308: 410-416, doi:10.1016/j.epsl.2011.06.010.
- NORTON, O. R. 1998: *Rocks from space: Meteorites and meteorite hunters*. Mountain Press Publishing, Missoula: 447 p.
- NORTON O. R. 2002: *The Cambridge encyclopedia of meteorites*. Cambridge University Press, Cambridge: 354 p.
- NORTON, O. R. & CHITWOOD, L. A. 2008: *Field guide to meteors and meteorites*. Springer, London: 287 p.
- OLSEN, E. J., KRACHER, A., DAVIS, A. M., STEELE, I. M., HUTCHEON, I. D. & BUNCH, T. E. 1999: The phosphates of IIIAB iron meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 34: 285-300.
- OXFORD INSTRUMENTS 2006: *INCA energy operator manual*. Oxford Instruments Analytical Ltd., High Wycombe: 85 p.
- SCOTT, E. R. D. 1972: Chemical fractionation in iron meteorites and its interpretation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36: 1205-1236.
- SCOTT, E. R. D. & WASSON, J. T. 1975: Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13: 527-546.
- TAGLE, R., STOEFFLER, D., CLAEYS, P. & ERZINGER, J. 2003: A non-magmatic iron meteorite as impactor for the Rochechouart crater. *Lunar and Planetary Science XXXIV*: 1835.pdf.
- WASSON, J. T. 1985: *Meteorites: Their Record of Early Solar-System History*. W. H. Freeman and company, New York: 267 p.
- WASSON, J. T. & KALLEMEYN, G. W. 2002: The IAB iron-meteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2445-2473.
- YANG, J. & GOLDSTEIN, J. I. 2005: The formation of the Widmanstätten structure in meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40: 239-253.
- YANG, J. & GOLDSTEIN, J. I. 2006: Metallographic cooling rates of the IIIAB iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 3197-3215, doi:10.1016/j.gca.2006.04.007.
- YANG, J., GOLDSTEIN, J. I. & SCOTT, E. R. D. 2008: Metallographic cooling rates and origin of IVA iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 3043-3061, doi:10.1016/j.gca.2008.04.009.
- YANG, J., GOLDSTEIN, J. I. & SCOTT, E. R. D. 2010: Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 4471-4492, doi:10.1016/j.gca.2010.04.016.