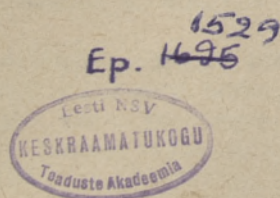


EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA  
АКАДЕМИЯ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР

---

GEOLOGIA INSTITUUDI  
UURIMUSED

ТРУДЫ  
ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ  
II



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1958

## KAALIJÄRVE METEORIIDIKRAATRI Nr. 3 MAGNETO- MEETRILISEST UURIMISEST

E. POBUL

Saaremaal, Kingissepa (end. Kuressaare) linnast umbes 20 km kirdes, Kaali külanõukogu piires, asub looduslikult kaunis Kaali järv. Kõrge valliga ümbritsetud korrapärane 110 m läbimõõduga kausikujuline järv on enam kui sajandi vältel köitnud paljude teadlaste tähelepanu, kes on järve tekkeloo kohta püstitanud rea mitmesuguseid oletusi (I. Reinwaldt, 1928). Alles 1937. aastal õnnestus mäeinsener I. Reinwaldil, kes uuris nimetatud järve 1927. aastast alates, leida Kaali järve naabrusest kahest väiksemast lehtrikujulisest süvendist mõnikümmend väikest raudmeteoriidi kildu, kogukaaluga 120 g. Seega oli lõplikult tõestatud Kaali järve ja tema naabruses oleva, umbes 0,25 km<sup>2</sup> maa-alal paikneva 6 väiksema lehtri meteoriitne päritolu. Selle avastusega sai Kaali järv, kui üks suuremaid ja ainulaadsemaid raudmeteoriidi kraatreid maailmas koos oma naaberkraatritega üldtuntuks Kaalijärve meteoriidikraatrite grupi nimetuse all. Seoses Eesti NSV Teaduste Akadeemia meteoriitide komisjoni asutamisega 1954. aasta lõpul kerkis päevakorrale Kaalijärve meteoriidikraatrite uurimise jätkamine. Geoloogia Instituudi 1955. aasta tööplaanis nähti ette ühe väiksema Kaalijärve kraatri (nr. 5) morfoloogia uurimine, meteoriidikildude otsimine ja kraatri nr. 3 katselise magnetomeetrilise uurimise teostamine. Kraater nr. 3 oli ainukene, mis polnud tihedat põõsastikku täis kasvanud ja osutus uurimistööde läbiviimiseks sobivaimaks.

Kaalijärve meteoriidikraater nr. 3 kujutab endast korrapärast, ilma vallita kausikujulist süvendit, mis väga sarnaneb suure karstilehtriga. Kraatri läbimõõt on 33—35 m, sügavus kuni 3,7 m. Kraatri keskosa on lage, kuid nõlvad on kaetud sarapuupõõsastikuga, mis puudub ainult kraatri põhjasektoris.

Kraatri välist ilmet rikuvad 9 suurt rändrahnud, mis hiljuti põldude puhastamise ajal on veetud kraatri kirdenõlvale. Kraatri läänesektorisse on sõja ajal kaevatud paari meetri pikkune kaevik, mida naabruses asuva talu elanikud kasutasid varjendina. Praegu on kaevik poolenisti kinni aetud ja umbrohtu täis kasvanud, mistõttu ta on märgatav ainult kraatri nõlva ebatasasuse tõttu.

Suvel on kraatri põhi täiesti kuiv, kuid kevadisel lumesulamise ajal, samuti suurte vihmade ajal voolab kraatrisse palju vett, mis aga peagi kaob. Nähtavasti laseb kraatri lõhenenud ja karstistunud dolomiitne aluspõhi vett hästi läbi.



Teatavasti on raudmeteoriitide üheks põhiliseks tunnuseks nende tugev magnetism. Meteoriidikildude magnetismi on kerge kindlaks teha hariliku kompassi abil, kusjuures sageli avaldub ka kildude magnetiline polaarsus.

Meteoriitide magnetilised omadused olenevad nikkelrauasisisaldusest. Raudmeteoriidid sisaldavad niklit 5—30%; maa sees leiduva eheda raua niklisisaldus ei ületa 2—3%. Eriti tunduvat magnetilist mõju avaldab raudmeteoriite ümbritsev sulamiskoorik, mis tekib kosmilise kiirusega Maa atmosfääri läbiya meteoriidi pealispinnal selle sulamise ja hiljem hangumise tagajärjel. Meteoriidi sulamiskoorik on mineraalselt koostiselt magnetiit —  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , erikaaluga 4,0.

Meteoriitide magnetilisi omadusi pole seni veel põhjalikult tundma õpitud. On ainult teada, et üksikutel juhtudel on nii raud- kui ka kivi-meteoriitides avastatud jääk-magnetismi. Meteoriitide magnetiseerumise põhjused pole aga seniajani üksikasjalisemalt selgitatud.

Meteoriidikraatrite magnetomeetrilise uurimise kohta leidub kirjanduses vähe andmeid, mis on tingitud esiteks sellest, et raudmeteoriite ja nende kraatreid leidub üldse vähe ja teiseks põhjuseks on asjaolu, et magnetomeetrilist meetodit on kraatrite uurimiseks hakatud kasutama alles võrdlemisi hiljuti.

On teada, et enne Teist maailmasõda on Põhja-Ameerikas, Arizonas, maailma suurima raudmeteoriidikraatri (läbimõõt 1207 m) ümbruses teostatud magnetomeetrilisi ja gravimeetrilisi mõõtmisi. Mingeid selgelt väljenduvaid anomaaliaid nende mõõtmistega ei avastatud. Sellest järeldati, et suuri meteoriittraua masse seal ei leidu. Pärast sõda, kui miiniotsijaid tunduvalt täiustati, kasutas neid G. Nininger Arizona meteoriidikraatri uueks uurimiseks. Üheaastase süstemaatilise uurimistöö tulemusena avastati umbes 5000 raudmeteoriidikildu, mis paiknesid kraatris radiaalsete vöönditena. Nagu näitasid kogemused, võis miiniotsija avastada suuremaid meteoriidikilde, mis asusid pinnases 25—60 cm sügavusel. Katsed täiustatud tundliku aparatuuriga näitasid, et maa sees olevat 45-kilogrammist meteoriiti oli võimalik avastada kuni 6,5 m sügavuses. Hilisemal kraatri magnetilisel mõõdistamisel avastati rida nõrku anomaaliaid. Kaevetöid nende kohal senistel andmetel pole teostatud. (Nininger, 1949).

Nõukogude Liidus on magnetomeetrilist meetodit tulemusrikkalt kasutatud Sihhote-Alini (Фонто́н, 1949) raudmeteoriidi lehtrite uurimisel 1948. aastal. Seal teostas S. S. Fonton magnetomeetri M-2 abil 12 meteoriidilehtri magnetilist mõõdistamist. Vastavalt meteoriidilehtrite suurusele (suurima lehtri läbimõõt oli kuni 28 m), valiti vaatlusvõrgu silmaks 0,5 kuni 2 m. Magnetilise mõõdistamise tulemuste kohaselt võib Sihhote-Alini meteoriidilehtreid jagada kahte gruppi: I grupis esinevad väga nõrgad ja lokaalsed vertikaalintensiivsuse anomaaliad madalama ja rahulikuma magnetivälja taustal. Magnetivälja iseloomust võis järeldada suurte meteoriittraumasside puudumist. II grupis esinevad teravad magnetilised anomaaliad, ulatudes mõnesaja gammani, mis tõendab suurte meteoriittraumasside olemasolu. Järgnenud kaevetööde tulemused kinnitasid magnetomeetrilise uurimise põhjal tehtud järeldusi. I grupi lehtritest leiti hulgaliselt väikesi meteoriidikilde, kuna II grupi lehtritest leiti suuri üksikeksplare kaaluga kuni 500 kg. (Фонто́н, 1949).

Need näited on peaaegu ainukesed positiivsed teated, mis on seni olemas meteoriidikraatrite magnetilise uurimise ja meteoriidikildude otsimise kohta magnetomeetrilise meetodi abil.

1. Reinwaldi (1939) andmeil teostas 1929. aastal prof. K. Andrée

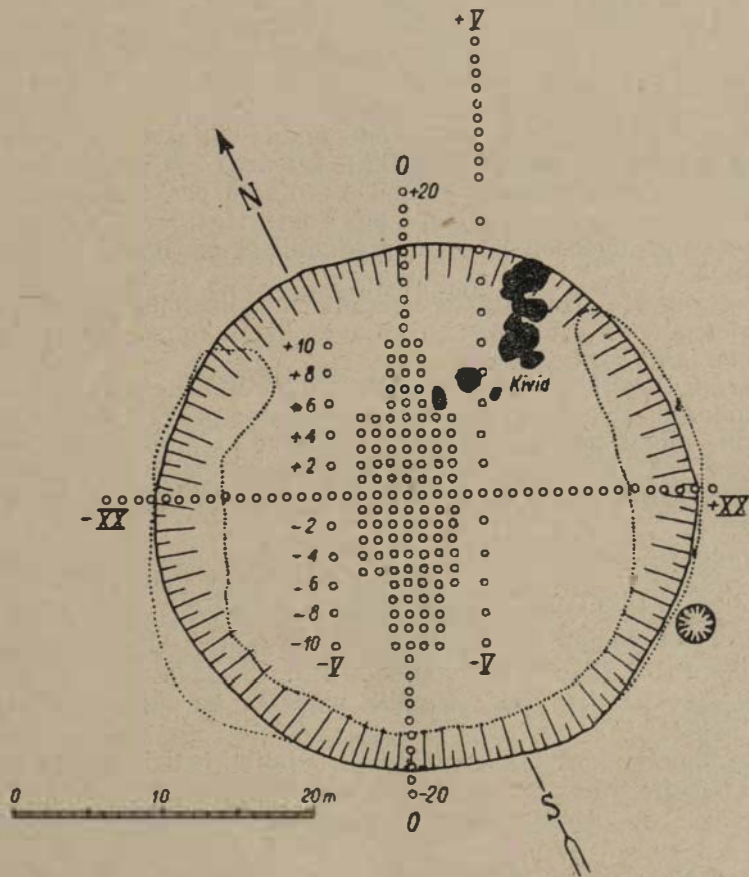
Kaalijärve peakraatri magnetilist mõõdistamist, mis ei andnud aga soovitud tulemusi. Kahjuks pole selle mõõdistamise ulatuse, metoodika ja täpsuse kohta lähemaid andmeid.

### Magnetilise mõõdistamise metoodikast

Kaalijärve meteoriidikraatrite magnetomeetrilise uurimise võimaluste selgitamiseks teostas käesoleva artikli autor 1955. aasta suvel kraatri nr. 3 katselist magnetilist uurimist.

Meteoriidikraatreist nr. 2 ja nr. 5 oli I. Reinwald seni leidnud ainult väikesi meteoriidikilde, millede kaal ainult erandjuhtudel ületas mõne grammi. Võis arvata, et säärase kildude otsimiseks on magnetomeetriaalne uurimismeetod vähe efektiivne. Seetõttu oli esialgse uurimise peamiseks ülesandeks selgitada, kas uuritavas meteoriidikraatris ei esine küllalt selgeid ja tugevaid magnetilisi anomaaliaid, mis osutaksid suuremate meteoriitrauamasside olemasolule kraatris.

Magnetilisel mõõdistamisel kasutati tehase «Geologorazvedka» M-2 tüüpi magnetomeetrit (vertikaalvariomeetrit). Ööpäevase magnetilise variatsiooni vaatlusteks kohapeal kasutati teist sama tüüpi variomeetrit. Aparaatide skaala jaotuste väärtusi kontrolliti enne välitööd Helmholti rõngaga ja välitöödel iga päev ka deflektormagnetitega.



Joon. 1. Kraatri nr. 3 magnetilise mõõtevõrgu skeem.

Kraatri nr. 3 magnetivälja üldise iseloomu selgitamiseks rajati läbi kraatri tsentri kõigepealt kaks risti asetsevat alusprofiili. Kraatri tseenter valiti ühtlasi kraatri mõõdistamise lähte- ja kontrollpunktiks. Vaatluspunktide vahemaaks alusprofiilidel valiti 1 m, et mitte vahele jätta võimalikke väikesi ja nõrku anomaaliaid (joon. 1).

Mõõdistamisel kasutati ühe magnetomeetri jaoks kahte statiivi. Samal ajal, kui toimusid vaatlused ühes mõõtepunktis, seati teine statiiv üles teises punktis, mis asus esimesest küllalt kaugel (7 kuni 10 m), et statiivi ülesseadmine ei segaks vaatlusi. Aparaaadi ümbertöstmisega ühelt statiivilt teisele — juba orienteeritud statiivile — oli profiili võimalik läbida minimaalse ajakuluga. Sellega välditi ühtlasi magnetilise variatsiooni, temperatuuri ja aparaaadi nullpunkti suuri nihkumisi, sest kontrollpunkti vaatluste vahe ei ületanud 1—2 tundi.

Vaatlusi teostati magnetsüsteemi neljakordse mõõtmisega kahes positsioonis, kusjuures kasutati võimalikult madalat vaatlusasendit (kokkupandud statiiviga).

Ööpäevase magnetilise variatsiooni jälgimiseks seati kraatri varjupoolsele nõlvale üles teine variomeeter, mille arreteerimata magnetsüsteemi vaatlusi teostati iga 5 minuti järel.

Mõõtepunktide esialgsed suhtelised väärtused arvutati kohapeal kohe pärast iga üksiku profiili mõõtmist. Juba esimeste alusprofiilide mõõtmise tulemused näitasid, et kraatris nr. 3 vaevalt esineb nimetamisväärseid magnetilisi anomaaliaid. Seepärast ei saadud järgmiste profiilide rajamisel mõõtetihedust vähendada, mõõtepunktide vahekaugus jäi samaks. Et ka järgmiste profiilide mõõtmisel polnud eelarvutustega võimalik selgitada mingeid nimetamisväärseid anomaaliaid kraatris, piiruti vaid kraatri keskosa mõõdistamisega.

Et selgitada, kas magnetiline mõõdistamine väljaspool kraatrit osutub tulemusrikkamaks, pikendati üht profiili kraatrist väljapoole. Samal eesmärgil tehti katselisi profiilmõõtmisi ka Kaali peakraatri nõlval ning mõõdistati väike «katselapp» järve põhjaosas isegi vees. Kokku teostati kahe nimetatud meteoriidikraatri magnetilisel uurimisel vaatlusi 222 mõõtepunktis.

Peale esialgsete arvutustööde, mis olid mõõdistamise käigu kohapealseks jälgimiseks ja suunamiseks hädavajalikud, toimus hiljem väliandmete kameraalne läbitöötamine.

Kõigepealt viidi kõik lugemid ühele temperatuurile ja arvutati vastavad parandused. Temperatuuri parandused sama päeva kohta ei ületanud 2—3 γ, kuid mõnel päeval ulatus maksimaalne parandus kuni 6 γ-ni.

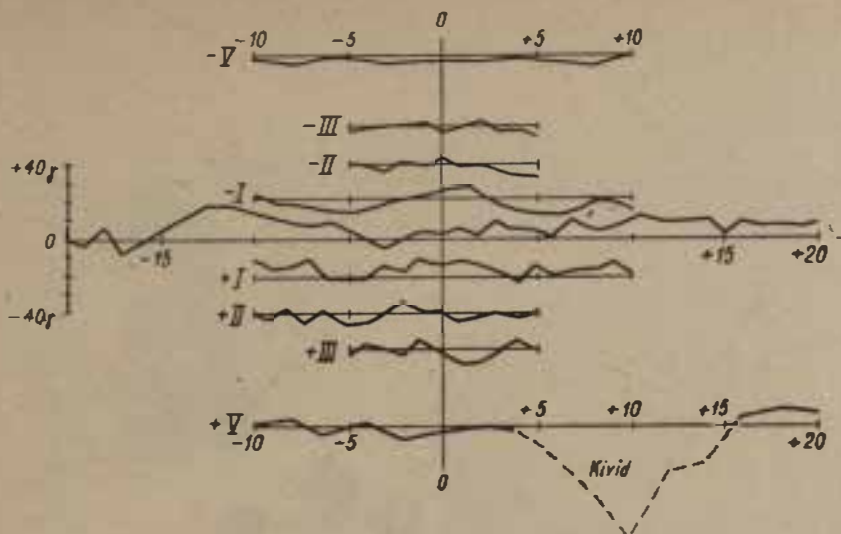
Maksimaalne ööpäevase magnetilise variatsiooni muutumine kogu mõõtmiste kestel ulatus kuni 16 γ-ni. Seega püsis magnetiline aktiivsus normaalsena.

Et ööpäevase variatsiooni mõõtmine eri päevadel ei toimunud ühes ja samas punktis, siis magnetomeetri nullpunkti nihkumist otseselt ei määratud. Kuid kasutades mõõdistamise süsteemi, kus iga profiil mõõdistati kinnise polügoonina ja lõpuks profiili otsapunktide vahetu sidumine sulges ringpiirina kogu polügoonide võrgu, oli mõõtmiste ühise tasandamise käigus kaudsel teel võimalik määrata ka magnetomeetri nullpunkti nihkeid.

Mõõteandmete ühine tasandamine oli vajalik kraatri keskosa magnetiliste anomaaliade pinnalise jaotumuse tundmaõppimiseks, kuna üksikutes profiilides ei avaldunud nimetamisväärseid ja selgeid anomaaliaid (joon. 2).

Polügoonide süsteemi tasandamine toimus analüütilisel meetodil, mis oli välja töötatud eelkõige gravimeetrilise sõlmpunktide võrgu jaoks.





Joon. 2. Kraatri nr. 3 magnetiliste mõõteprofiilide  $\Delta Z$  graafikud.

Polügoonide ühtse tasandamise tulemusena leiti sõlmpunktide (s. o. profiili otsapunktide) tõenäolised väärtused. Profiili reapunktide tasandamine toimus ajaliselt igas profiilis omaette, vastavate sõlmpunktide vahel; sellega kõrvaldati ühtlasi ka magnetomeetri nullpunkti nihkumine, mis mõõtmiste kestel ulatus maksimaalselt 9 gammani.

Mõõtmistäpsust iseloomustab sõlmpunkti tasandatud väärtuse keskmine ruutviga  $\varepsilon$  keskm. =  $\pm 0,65\gamma$  ja reapunkti vaatluse keskmine ruutviga  $\varepsilon = \pm 0,88\gamma$ .

Et nullpunkti nihkumise tegelik käik on siiski teadmata, siis võime nullpunkti väiksema hüppelise nihkumise korral reapunkti mõõtmise täpsust ikkagi hinnata küllaldase kindlusega kuni  $\pm 2\gamma$ .

### Magnetilise uurimise tulemused

Kaalijärve meteoriidikraatri nr. 3 keskosa magnetivälja iseloomustab joonis 3. Maamagnetismi vertikaalintensiivsuse anomaaliade ( $Z_a$ ) kujutamiseks on suhteliseks normaalväljaks valitud tasapind, mis kõige reljeefsemalt tõstab esile kraatri magnetilisi mikroanomaaliaid. Nagu joonisest selgub, on kraatri magnetiväli tavalises mõistes rahulik. Magnetilise vertikaalkomponendi maksimaalne amplituud kraatri keskosas on ainult 23  $\gamma$  (välja arvatud kraatri idaosas suurte rändrahnude poolt tekitatud häired). Ka kogu kraatrit läbivais ristprofiilides püsivad magnetilise vertikaalkomponendi väärtused väga ühtlasel tasemel ega ületa eeltoodud ekstreemväärtusi.

Et ööpäevase magnetilise variatsiooni ja temperatuuri mõju ning magnetomeetri nullpunkti nihkumise varieerumine toimub ligikaudu samades piirides kui magnetivälja väärtuste kõikumine, siis polnud enne andmete lõplikku tasandamist võimalik saada ülevaadet kraatri mikroanomaaliatest. See asjaolu takistas mõõtmiste käigus mitte ainult magnetiliste anomaaliade leviku jälgimist, vaid põhjustas ka kahtlaste tulemustega, kuid aegaviitvate mõõdistamiste katkestamise, sest põhiliselt oli selgitatud, et kraatris nr. 3 mingeid silmapaistvaid magnetilisi anomaaliaid.



Joon. 3. Kraatri nr. 3 keskosa magnetiliste mikroanomaaliale pinnaline levik. Isoanomaalid iga 2 γ tagant.

liaid ei leidu. Samale tulemusele jõudsime ka väljapoole kraatrit pikendatud profiili ja Kaali järve kaldail teostatud katsemõõtmiste puhul, sest mingit kvalitatiivset magnetivälja erinevust võrreldes kraatri nr. 3 magnetiväljaga ei ilmnenu.

Pärast välisandmete kameraalset läbitöötamist ja tasandamist ilmnas, et kraatri mõõdistatud osas esinevad siiski üsna huvitavad magnetilised mikroanomaaliad. Ümbritsevast loonist kerkivad esile üksikud anomaalsed tipud ligikaudu kümnekonna gamma võrra. Need mikroanomaaliad on enamasti üksteisest isoleeritud, ovaalse või kohati venitatud kujuga. Tugevamad mikroanomaaliad asetsevad pikettide 0+3, 0+7, 0—11, +I+5, +I—1 ja +II—2 piirkonnas; kohati ilmnevad ka nende satelliitmiinimumid. Kuigi profiilis 20—0—20 torkavad silma piki profiili venitatud anomaaliad, ei saa anomaaliade levikus siiski kindlat orientatsiooni esile tõsta, sest ka teistes suundades esineb anomaaliade tunduvalt venitatust. Tõenäoliselt on kraatri mikroanomaaliad radiaalse levikuga, kuid kraatri keskosas mõõdistatud väikese pindala tõttu pole võimalik saada täielikku ülevaadet magnetiliste mikroanomaaliade levikust kogu kraatri ulatuses.

Kraatri magnetilised anomaaliad huvitavad meid peamiselt meteoriidikildude otsimise seisukohalt. Tugevate magnetiliste anomaaliade puudumise tõttu jääb üle selgitada, kas nõrgad mikroanomaaliad pole mitte põhjustatud väikestest meteoriidikildudest.

Tuleb rõhutada, et magnetiliste mikroanomaaliade põhjuste tundmaõppimiseks polnud meie käsutuses mingeid konkreetseid andmeid pinnase ja aluspõhja kivimite ning meteoriidikildude magnetiliste omaduste kohta; vastavate uurimiste teostamiseks puudusid aga võimalused. Magnetiliste mikroanomaaliade uurimiseks kohalikes tingimustes puuduvad seni üldse kogemused. Vaatamata neile olulistele puudustele, võib teha mõningaid oletusi magnetiliste mikroanomaaliade põhjuste kohta.

Kraatri nr. 3 magnetivälja iseloomu põhjal selgub, et esinevad mikroanomaaliad ei või olla põhjustatud kuigi sügaval asetsevatest häirivatest kehadeist. Sageli juba ühe meetri kaugusel, s. o. järgmise piketi kohal, on anomaalia kadunud. Siit võib järeldada, et häiremassid asetsevad ligikaudu 1—2 m sügavuses või mõnel juhul veelgi kõrgemal. Mis puutub häirivate kehade võimalikesse mõõtmistesse, siis võib ligikaudu isomeetrilise kujuga anomaaliade puhul öelda, et häirekeha mõõtmed ei ületa mingil juhul mõnda detsimeetrit, vaid on tõenäoliselt tunduvalt väiksemad. Venitatud anomaaliad võivad olla ka mitme häiriva keha liitmõju tagajärjeks ja seetõttu ei pruugi anomaalia venitus iseloomustada häirekehade maksimaalseid mõõtmeid.

Üldtoodust selgub, et kraatri nr. 3 magnetiliste mikroanomaaliade võimalikke põhjustajaid tuleb otsida kas aluspõhjast või pinnakattest, mis antud juhul ulatub kuni 1,5 m paksuseni.

Kaalijärve meteoriidikraatrite piirkonnas avanevad aluspõhjas siluri kaarma lademe dolomiidid. Vaatamata konkreetsete andmete puudumisele nimetatud sette kivimite magnetiliste omaduste kohta, pole põhjust nende väga ühtlastes tingimustes settinud kivimite magnetilist sustseptiiblust pidada palju erinevaks kui naaberaladel. Teatavasti kõigub lubjakivide, dolomiitide ja merglite magnetiline sustseptiiblus väikestes piirides —  $\chi \approx 2 \cdot 10^{-6}$  kuni  $20 \cdot 10^{-6}$  (CGSM). Et esile kutsuda näiteks 10  $\gamma$  anomaaliat, selleks peab otse maapinnal paljanduva kivimi magnetiline sustseptiiblus olema  $\chi = 30 \cdot 10^{-6}$  (CGSM). Siinjuures tuleb silmas pidada veel asjaolu, et lubjakivide füüsikaliste omaduste suur püsivus ei laseks praktiliselt mingit nimetamisväärtset anomaaliat esile kerkida.

Mõnevõrra erinev olukord võib esineda lubjakivides, mis on tugevasti lõhenenud ja kus tavaliselt esinevad karstinähtused. Siin võib teatud juh-



tudel kivimi lõhedes ja õõnsustes pinnase või põhjavete kaasabil kontsentreeruda lahustunud ja uuesti settinud rauaühendeid, või muud magnetiliselt aktiivset materjali (mõningad savid, liivad jm.) sel määral, et lubjakivides võiks tekkida mikromagnetiline efekt. Selline magnetilise mikroanomaalia tekkimise põhjus jääb siiski ainult teoreetiliseks võimaluseks, sest seni pole taolisi nähtusi lähemas ümbruses ja ka kraatri nr. 5 lahtikaevamisel (A. Aaloe, 1958) täheldatud.

Nii nagu aluspõhi, nii võib ka pinnakate magnetilisi anomaaliaid põhjustada ainult oma ebaühtlase koosseisu ja selle järsult erinevate magnetiliste omaduste tõttu. Peamiselt põhimoreenist koosneva kvaternaarse pinnakatte paksus on võrdlemisi püsiv, ulatudes Kaali meteoriidikraatrite piirkonnas kuni 1,5 meetrini. Põhimoreenis leiduvad rändkivid ja liiv sisaldavad mõningal määral ka magnetilisi komponente. Eriti tuleb märkida põhimoreenis leiduvaid väikesi magnetiidikristalle (läbimõõduga alla 0,3 mm). Kuid asjaolu, et viimased on suurel maa-alal väga ühtlaselt hajutatud (A. Aaloe, 1958), teeb ebatõenäoliseks, et mõõtmeilt väga väikesed magnetilised anomaaliad oleksid põhjustatud magnetiidikristallidest.

Põhimoreenis leiduvate rändkivide magnetilise mõju selgitamiseks osutame praktilisele kogemusele, mis on saadud kraatri nr. 3 magnetilise mõõdistamise käigus. Profiilis V teostatud mõõtmised näitavad, et kraatrisse lükatud suurte rändkivide magnetiline mõju on õige tunduv. Näiteks paaritonnine rändrahn põhjustab 30–40 cm kauguselt vertikaalkomponendi  $Z$  kõrvalekaldumise umbes  $30\gamma$ ; 1 m kaugusel kümnetonnisest kivist on  $Z$  kõrvalekaldumine ligikaudu  $60\gamma$  ja isegi 1,5 m kaugusel on selle kivimassi mõju veel  $20\gamma$  piirides. Seevastu aga umbes 200 kg raskune rändkivi 60 cm kaugusel aparaadist ei avalda mõõtmistele praktiliselt mingit mõju.

Sellest järeldub, et põhimoreenis peituv rändkivi peab olema vähemalt mõnesaja kilogrammi raskune, et ta magnetiline mõju oleks üldse märgatav. On aga vähe tõenäoline, et selline kivimürakas, mille mõõtmed pealegi ületavad anomaalia mõõtmeid, saaks peituda kraatris, kus pinnakate koosneb meteoriidi plahvatusel ülespaisatud ja tagasilangenud aluspõhja ja pinnasematerjalist.

Edasi vaatleme, milline osatähtsus magnetiliste mikroanomaaliate kujunemisel võiks olla meteoriittraual. Nagu juba eespool märgitud, ei saa magnetiliste häirurite mõõtmed ületada mõnda detsimeetrit, vaid on tõenäoliselt palju väiksemad. Suurte meteoriidikildude (mahuga üle  $1\text{ dm}^3$ , s. o. umbes 7–8 kg) leidmine ei saa kõne alla tulla, sest magnetilised anomaaliad peaksid sel juhul olema kümneid ja enam kordi suuremad. Kuna meteoriitne tolm ja peenike meteoriidipuru tavaliselt esineb hajutatult ja on paljude sajandite jooksul kannatanud tugeva oksüdeerumise all, on vähe lootust, et Kaali meteoriidikraatrites oleks käesoleval ajal säilinud kuigi suur osa meteoriitsest tolmust või meteoriidipurust. Seetõttu võib oletada, et ka kuhjunud peenema meteoriitse materjali osatähtsus magnetiliste anomaaliate kujunemisele on väga väike. Järelikult peavad kraatris nr. 3 esinevad mikroanomaaliad, kui nad üldse on põhjustatud meteoriittraust, olema esile kutsutud meteoriidi keskmise suurusega kildudest, mille kaal on parkümmend kuni mõnisada grammi.

Ülaltoodud arutluste täpsustamiseks oli meil hiljem võimalus katsetada kraatris nr. 5 A. Aaloe poolt 1955. aastal leitud meteoriidikildude magnetilist mõju. Kogutud väiksemad meteoriittraua killud sorteeriti ja eraldati läbimõõdu järgi eri fraktsioonidesse, kuna üksikud suuremad killud olid eraldi. Katsetamine toimus hariliku magnetomeetri M-2 abil, sest põhjalikumaks meteoriittraua magnetiliste omaduste määramiseks puudu-

sid võimalused. Vaatamata üsna primitiivsele katsetamisviisile õnnestus siiski saada mõningaid olulisi andmeid, mis lubavad täpsemalt määrata meteoriittraua magnetilist mõju.

Meteoriidikildude juures ilmnes selgesti nende magnetiline polaarsus. Siit järeldub, et ühe ja sama kildudefraktsiooni magnetiline mõju oleneb killukeste juhuslikust vastastikusest asendist. Seetõttu hoiti katsemõõtmistel meteoriittraua fraktsioone võimalikult segamatul kujul, et määrata magnetilise mõju sõltuvust meteoriittraua kildude hulgast. Seda tingimust õnnestus säilitada fraktsioonide I+II ja I+II+III katsetamise puhul. Katsetamise andmed on toodud tabelis 1.

Tabel 1

| Proovi nimetus                                                                        | Meteoriit-<br>raukildude<br>kaal g | Kaugus<br>magnetsüs-<br>teemist cm | Magneto-<br>meetri hälve<br>γ |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Fraktsioon I:<br>killud $\phi > 5$ mm                                              | 55,43                              | 31,2                               | 9—10                          |
| 2. Fraktsioon I+II:<br>killud $\phi > 5$ mm +<br>$\phi > 3$ mm                        | 140,38                             | 32,7                               | 12—13                         |
| 3. Fraktsioon I+II:<br>killud $\phi > 5$ mm +<br>$\phi > 3$ mm +<br>$\phi > 1$ mm     | 140,38                             | 105,0                              | 2—3                           |
| 4. Fraktsioon I+II+III:<br>killud $\phi > 5$ mm +<br>$\phi > 3$ mm +<br>$\phi > 1$ mm | 286,63                             | 34,7                               | 22—25                         |
| 5. Fraktsioon I + II + III:                                                           | 286,63                             | 69,0                               | 7—8                           |
| 6. Fraktsioon I + II + III:                                                           | 286,63                             | 103,0                              | 4—5                           |
| 7. Üksikeksemplar nr. 1:<br>tugevasti oksüdeerunud                                    | 8,48                               | 29,0                               | 7—9                           |
| 8. Üksikeksemplar nr. 2:<br>vähe oksüdeerunud                                         | 7,05                               | 28,5                               | 22—25                         |
| 9. Üksikeksemplar nr. 3:<br>keskmiselt oksüdeerunud                                   | 8,62                               | 28,5                               | 10—12                         |
| 10. Harilik taskunuga, asetatud<br>vertikaalselt                                      | 100,4                              | 32,0                               | 12                            |

Meteoriittraua magnetiline mõju oleneb õige tunduval määral kildude oksüdeerumise astmest. See ilmneb tugevasti oksüdeerunud ja vähe oksüdeerunud, kuid kaalult ja kujult lähedaste meteoriidikildude (üksikeksemplarid nr. 1 ja 2) magnetilise mõju võrdlemisel.

Katseandmete lähem analüüs näitab, et aparaadi magnetsüsteemist kaugemal väheneb meteoriidikildude magnetiline mõju lineaarses vahekorras. Näiteks kauguse suurenemisega 2 korda väheneb meteoriittraua magnetiline mõju ligikaudu 3 korda; kauguse suurenemisega 3 korda väheneb magnetiline mõju 4,5 korda jne. Seega on lineaarse olenevuse tegur ligikaudu 1,5.

Meteoriittraua massi ja selle magnetilise mõju vahekord on samuti lineaarne: massi suurenemisega ligikaudu 2 korda suureneb ka magnetiline mõju ligikaudu samal määral (proovide 2, 3, 4 ja 6 puhul).

Kuna meid huvitab eelkõige meteoriidikillu minimaalne mass, mis võiks esile kutsuda näiteks 10 γ anomaalia (nagu enamasti fikseeriti ka kraatris nr. 3), kasutame sellise killu massi arvutamiseks ülaltoodud andmeid. Asetades näiteks meteoriittraua üksikeksemplari nr. 2 maasse 1,5 m sügavusse ja oletades, et aparaadi kõrgus maapinnast on umbes 0,5 m, saame magnetomeetri hälve ligikaudu 2,4 γ. Et tekitada 10 γ hälvet, peaks meteoriidikillu mass olema enam kui 4 korda suurem, s. o. umbes 30 g.

1 meetri sügavuses maapinnast peaks samasuguse anomaalia tekitamiseks vajalik meteoriidikillu mass olema umbes 21 g. Meenutame siinjuures, et I. Reinwaldi poolt leitud suurim meteoriidikild kaalus 24 g.

Kaalijärve meteoriidikraatri nr. 3 katselise magnetilise uurimise tulemusi kokku võttes võime märkida järgmist.

1. Kraatris nr. 3 ei esine silmapaistvalt tugevaid magnetilisi anomaaliaid, samuti ei leidunud neid ka Kaalijärve kaldal.

2. Kraatris nr. 3 esinevad nõrgad, järsu gradiendiga magnetilised mikroanomaaliad.

Ülaltoodust võime järeldada, et kraatris nr. 3 ja tõenäoliselt ka Kaalijärves (peakraatris) ei leidu suuri meteoriittraumasse, kuid kraatris nr. 3 leidub väga väikesi ja pinnalähedasi (1—2 m sügavusel asetsevaid) magnetilisi häirivaid kehasid.

Magnetiliste mikroanomaaliade põhjuste lähem vaatlus näitab, et võimalikeks, kuid vähe tõenäolisteks magnetilisteks häirijateks võivad olla aluspõhja ja pinnakalle koostise põhimassist järsult erinevate magnetiliste omadustega «võörkehad». Kõige tõenäolisemaleks magnetiliste mikroanomaaliade põhjustajaks võivad olla keskmise suurusega (alates kümnekonnast grammist) meteoriidikillud. Sarnaste meteoriidikildude olemasolu Kaalijärve meteoriidikraatris on faktiliselt tõestatud ning nende magnetiline aktiivsus on küllaldane magnetiliste mikroanomaaliade esilekutsumiseks.

### Uldisi märkmeid

Seoses järeldusega, et kraatris nr. 3 ja samuti peakraatris ei leidu suuri meteoriidikilde, kerkivad üles mõningad küsimused — milline seos on meteoriidi massil ja milline võiks olla meteoriidikildude maksimaalne mass, lähtudes kraatrite tekketingimustest?

Alljärgnevalt püüame neile küsimustele vastata, lähtudes meteoriidi uurimise kaasaegsetest teoreetilistest alustest (Е. Л. Кринов, 1955).

Kaalijärve meteoriidikraatrid on tekkinud raudmeteoriitide klassi kuuluvate meteoriitide maa peale langemise tagajärjel. Kaali kraatrite hiiglasuured mõõtmed räägivad võimsatest plahvatustest, mis järgnesid meteoriitide kokkupõrkele Maaga. Selliste gigantsete ehk nn. kraatrit moodustavate meteoriitide lõõgil vastu maapinda eraldub määratu hulk soojusenergiat, mille tagajärjel osa tahket ainet muutub silmapilkselt kuumaks kokkusurutud gaasiks. Gaasistunud meteoriidi ja pinnasekihtide laialipaiskumine toimub võimsa plahvatuse tagajärjel, mille tõttu tekib lehitlaoline meteoriidikraater.

Sarnaste kraatrit moodustavate meteoriitide langemise tingimuste uurimisel on viimasel ajal saavutanud suurt edu nõukogude teadlased K. P. Stanjukovitš ja V. V. Fedõnski. Nende uurimised näitavad, et kraatrite mõõtmed olenevad peamiselt meteoriitide langemise kiirusest. Kraatrite mõõtmed ületavad meteoriidi mõõtmeid alles langemise kiiruse puhul umbes 500 m/sek., kusjuures meteoriit peab purunema kildudeks ka vastu pehmet pinnast põrgates. Meteoriidi kiiruse puhul 3—4 km/sek. kokkupõrkel maaga vabanev energia ületab tahke aine kristallvõre vastupidavuse, mille tagajärjel toimub aine kiire aurumine. Tekkinud gaasi paisumine väljendub võimsa plahvatuse tagajärjel, kusjuures kristallvõre aurumise tsooni raadius ületab mitu korda meteoriidi mõõtmeid. Meteoriitidest säilivad sel juhul ainult vähesed killud, kuna meteoriidi põhiline mass aurustub ja muutub peenikesteks piiskadeks. Laialipaisatud killud langevad lõhekohta ümbrusse ja kraatrisse koos purustatud pinnasekihtidega. Meteoriidi langemise kiiruse puhul umbes 5 km/sek. on meteoriidi ja pinnase plahvatusel tekkinud purustuse mõju veelgi suurem.



Teoreetilised arvutused näitavad, et kraatri raadius  $B$  sõltub meteoriidi massist  $M$  ja langemise kiirusest  $v$  järgmiselt:

$$B \approx \sqrt[3]{v^2 M}$$

Sellest nähtub, et kraatri suurus oleneb suuremal määral langemise kiirusest kui meteoriidi massist. Üldiselt, mida suurem on kraater, seda enam on ka meteoriit purustatud, s. t. killud on väiksemad, kuid nende arv on suurem; samuti on sel puhul rohkem kilde paisatud väljapoole kraatrit. Seevastu meteoriitide suuri üksikeksemplare on leitud tavaliselt just väikestest kraatritest.

Ülaltoodu põhjal võime jämedais joontes hinnata Kaali meteoriitide langemise kiirust piirides 3—4 km/sek. Lähtudes kraatrite mõõtmetest ja teoreetilisest kiirusest, püüame ülaltoodud valemi abil määrata Kaali-järve meteoriitidemassi üksikute meteoriidikraatrite järgi (tabel 2).

Tabel 2

| Kraatri nr.            | Kraatri raadius m | Meteoriidi |                      |
|------------------------|-------------------|------------|----------------------|
|                        |                   | kaal kg    | läbimõõt (kerana) cm |
| 1                      | 17                | 550        | 50                   |
| 2                      | 18                | 650        | 55                   |
| 3                      | 17                | 550        | 50                   |
| 4                      | 10                | 110        | 30                   |
| 5                      | 6,5               | 30         | 20                   |
| Peakraater (Kaalijärv) | 55                | 18500      | 165                  |

Nagu tabelist nähtub, on Kaali meteoriitide mass ja mõõtmed üsnagi tagasihoidlikud.

On huvitav märkida, et I. Reinwald (1939) ja A. Aaloe (1958) avastasid kraatrite nr. 4 ja 5 põhjas väikese lohu, mida nimetatud autorid peavad meteoriidi löögijälgedeks. Nii näiteks leidub kraatris nr. 4  $1,0 \times 0,5 \times 0,5$  m ja kraatris nr. 5  $0,60 \times 0,52 \times 0,30$  m suurune lohk. Võrreldes ülaltoodud arvutuse tulemusena leitud meteoriitide mõõtmeid (meteoriidid on võetud tinglikult kerakujulistena) nende löögijälgedega, pole nende mõõtmete vahekorras märgata vastuolu. Võib oletada, et meteoriit tungis läbi pinnakatte teatava sügavuseni aluspõhja ja alles siis jõudis kokkupõrkel vabanenud energia tekitada võimsa plahvatuse, mis purustas meteoriidi ja tekitas kraatri.

Arvestades kraatrit moodustavate meteoriitide plahvatuse tingimusi, on vaevalt tõenäoline, et Kaali-järve meteoriidikraatritesse oleks jäänud järele suuri, nimetamisväärse massiga meteoriidiosi. Tuleb eeldada ikkagi väikeste, harva kuni mõnekümnegrammise kaaluga kildude leidumist kraatrites ja nende lähemas ümbruses. Seejuures suuremate kildude leidmise suhtes on perspektiivsemad just väiksemad kraatrid. Siit tuleneb ühtlasi praktiline järeldus, et magnetomeetria edaspidisel rakendamisel Kaali meteoriidikraatrite uurimisel tuleb peamine tähelepanu pöörata magnetiliste mikroanomaaliade tundmaõppimisele.

Kraatrit nr. 3 kavatsetatakse säilitada puutumatul kujul looduskaitse objektina kui kõige paremat näidist Kaali-järve meteoriidikraatritest. Seejärel ei tule selle kraatri ulatuslikum lahtikaevamine kõne alla. Küll aga on vaja kraatri esialgse kuju taastamiseks kõrvaldada kraatrist suured rändrahnud ja tasandada nõlva. Koos sellega võiks siiski kraatrit

kahjustamata kaevata markantsema mikroanomaalia kohal lahti mõni eespool märgitud pikettidest ning selgitada anomaalia põhjus.

Arvestades kraatri nr. 3 katselise magnetilise uurimise kogemusi, tuleks edaspidi magnetomeetrilist meetodit rakendada objektile, mida kavatsetakse täielikult lahti kaevata (näit. kraater nr. 5). Alles siis saab küllalt põhjendatult otsustada magnetomeetria efektiivsuse üle väikeste meteoriidikildude otsimisel.

#### KIRJANDUS

- Aaloe, A., Kaalijärve meteoriidikraatri nr. 5 uurimisest 1955. aastal. Eesti NSV Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituudi Uurimused II. Tallinn, 1958.  
Nininger, H. H., Popular Astronomy, 1949. Vol. 57. No. 1.  
Reinwaldt, I., Bericht über geologische Untersuchungen am Kaalijärv (Krater von Sall) auf Ösel. Tartu Ülikooli Loodusuurijate Seltsi Aruanded XXXV, 1928.  
Reinwald, I. A., The Kaalijärv Meteor Craters (Estonia). Tartu Ülik. Geol. Inst. toimetused nr. 55. Tartu, 1939.  
Кринов Е. Л. Основы метеоритики. Гос. изд. техн. теор. лит.-ы. Москва, 1955.  
Фонто́н С. С. Вторая экспедиция по изучению падения Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя. Метеоритика, вып. VI. Изд. Акад. наук СССР. Москва, 1949.

### МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТЕОРИТНОГО КРАТЕРА № 3 КААЛИЯРВ

Э. А. ПОБУЛ

*Резюме.*

Предварительная магнитометрическая разведка метеоритного кратера № 3 Каалиярв является первой попыткой применить магнитометрический метод для выявления метеоритного железа в Эстонской ССР.

Магнитная съемка кратера производилась по отдельным профилям по сети измерения  $1 \times 1$  м (рис. 1). При магнитной съемке и измерении суточных вариаций использовались два Z-вариометра. Средняя квадратичная ошибка наблюдений была в пределах  $\pm 1\gamma$ . Кроме магнитной съемки центральной части кратера № 3, производились измерения и вне кратера, а также в главном кратере — на береговом склоне озера Каали. На рис. 2 изображены кривые Z по отдельным профилям, а на рис. 3 — магнитное поле центральной части кратера № 3.

Магнитная съемка кратера № 3 показывает следующее. В кратере не встречается значительных магнитных аномалий; не обнаружены они также и на склонах берегов озера Каали. В этом кратере имеют место слабые, локальные магнитные изометрические и местами вытянутые микроаномалии. В распространении аномалий нельзя выявить определенную их ориентацию вследствие малого размера заснятой площади.

Магнитное поле центральной части кратера № 3 характеризуется максимальной амплитудой поля в  $23\gamma$  (исключая влияние больших валунов), причем максимальный градиент достигает  $17\gamma/\text{м}$ . Магнитные микроаномалии представлены величинами обычно около десяти гамм, при этом размеры отдельных аномалий достигают 1—3 м.

В результате магнитной съемки выяснилось следующее.

1. В кратере № 3 нет больших масс метеоритного железа; по всей вероятности нет их и в главном кратере Каалиярв.

2. Магнитные аномалии вызваны очень малым и неглубоко залегающим (1—2 м) возмущителем, причем размеры возмущающих тел, вероятно, не превышают нескольких дециметров.



В нашем распоряжении не имеется данных о магнитных свойствах ни доломита в коренном залегании, ни основной морены, образующей покров мощностью 1,5 м. Едва ли причиной магнитных микроаномалий могут быть отдельные малые метеоритные осколки (диаметром до нескольких миллиметров), подобные найденным на глубине 1—2 м в кратерах № 2 и № 5 Каалиярв (И. Рейнвальд, 1939; А. Аалоз, 1958). Чтобы вызвать такие микроаномалии, масса каждого отдельного осколка должна равняться по крайней мере двадцати граммам. Основу для такого заключения дают опытные измерения магнитного влияния осколков метеорита из кратера № 5 (см. табл. 1). Причиной возникновения описанных магнитных аномалий можно считать кристаллические валуны и магнетитовый песок, встречающиеся в основной морене, а также и минеральные соединения железа в трещинах коренных пород.

По теоретическим расчетам и соображениям автора, в метеоритных кратерах Каалиярв не может быть таких больших масс метеоритного железа, которые могли бы вызывать значительные магнитные аномалии. Поэтому объектом исследований здесь могут быть только магнитные микроаномалии. Расчетная ориентировочная масса метеоритов по отдельным кратерам приведена в табл. 2.

Так как кратер № 3 относится к объекту охраны природы, то полная раскопка его недопустима. Для проверки данных магнитной съемки было бы достаточно произвести раскопку на месте одного пикета в участке более выравненной микроаномалии. Только после такой проверки можно установить применимость магнитной разведки для выявления метеоритных осколков в кратерах Каалиярв.

*Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР*

## **MAGNITOMETRICAL INVESTIGATIONS OF CRATER No. 3 OF THE KAALIJÄRV GROUP**

**E. POBUL**

### *Summary*

The magnetometrical preliminary investigation of the Kaalijärvi meteorite crater No. 3 was the first attempt in the Estonian S.S.R. to apply the magnetometric method in the location of meteoric iron.

The magnetic measurement of the crater was effected in separate profiles, with the average measuring net of 1 by 1 m. Two vertical variometers were used in the measuring and in the observation of the 24-hour magnetic variation. The average square error of the observations was in the bounds of  $\pm 1 \gamma$ .

There being no considerable magnetic anomalies in the central part of crater No. 3, some observations were carried out in separate profiles outside the crater and on the shores of the main crater of the Kaalijärvi group — Kaali Lake.

The magnetic measurements have yielded the following results:

1. No considerable magnetic anomalies were observed in crater No. 3, none were observed on the shores of Kaali Lake, either.

2. At crater No. 3 only very weak (generally in the bounds of  $10 \gamma$ ) and extremely local magnetic microanomalies were observed.

From the above we may draw the conclusion that no considerable meteoric iron masses are to be found in crater No. 3 nor, evidently, in the



main crater; the magnetic microanomalies were caused by very small disturbers lying near the surface (ab. 1 — 2 m.).

On the basis of the effected observations the author concludes that magnetic microanomalies might be caused by meteoric splinters. Some meteoric splinters found in the course of measurements of crater No. 5 carried out by the author may serve as proof of this assumption. Thus, a meteoric splinter of ab. 20 g may, at a depth of 1 m., cause a magnetic microanomaly of about 10. The biggest meteoric splinter hitherto found in the craters of Kaalijärv weighs 24 g.

As crater No. 3 is under State protection as an important natural-historical object, no excavations have been carried out on its site. The effectivity of the magnetometrical method for the location of meteoric splinters may only be proved by carrying out corresponding checking excavations.

*Academy of Sciences of the Estonian S. S. R.,  
Institute of Geology*