

Radiolokācijas metodes pielietojums eolo nogulumu pētījumos

Juris Vībāns¹, Jānis Karušs^{2, 1-2} *Latvijas Universitāte*

Kopsavilkums. Darbā ir analizētas radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas eolo nogulumu pētījumos. Pētījumā tika veikti radiolokācijas profilēšanas darbi plašā frekvenču diapazonā (75–2000 MHz), iekšzemes eolo nogulumu izplatības areālā Valkas novadā. Ir iegūti nogulumu paraugi, noteikts to granulometriskais sastāvs, kā arī dabiskā mitruma daudzums. Aprēķināts radiolokācijas signāla izplatīšanās ātrums ģeoloģiskā griezumā. Izmantojot iegūtos rezultātus, tika izdarīti secinājumi par radiolokācijas metodes lietošanas iespējām eolo nogulumu pētījumos, kā arī par nākotnē pētāmām problēmām.

Atslēgas vārdi: ģeoradars, lietišķā ģeofizika, iekšzemes eolās formas, smilts elektromagnētiskās īpašības.

ģeoloģiskajai darbībai, kas pārvietoja glaciolimniskos nogulumus, radot eolo formu reljefu [9].



1. att. Pētījumu teritorijas novietojums.

IEVADS

Ģeoloģiskajos pētījumos radiolokācijas metode pasaulē tiek plaši izmantota jau vairāk kā 15 gadus, pateicoties tās realizācijas ātrumam, augstai izšķirtspējai un aizvien plašākai pieejamībai [1]. Tiek turpināti meklējumi, kā paaugstināt metodes jutīgumu atbilstoši mūsdienu pētījumu detalitātes prasībām, piemēram, verificējot radarogrammās konstatējamus signālus ar laboratoriski nosakāmām, pētāmās vides fizikālajām īpašībām [2].

Aktuālākās zinātniskās literatūras studijas ļauj secināt, ka vairums pētnieku pasaulē saista signālus, kas iegūti eolos nogulumos, ar to vizuāli konstatējamām saguluma īpatnībām [3,4,5,6], balstoties uz, no seismiskās stratigrāfijas pārņemtiem, radiolokācijai piemērotiem, metodiskiem principiem [7,8]. Pēc šiem principiem zonas ar vienādām vai līdzīgām atstaroto signālu īpašībām radarogrammās tiek mākslīgi nodalītas („radarfācijas”). Minētās zonas tiek saistītas ar atšķirīgām nogulumu struktūrām, bieži nepārbaudot iegūto signālu noturību plašā frekvenču diapazonā un to pamatotību ar nogulumu fizikālo īpašību izmaiņām.

Pamatojoties uz iepriekš minētajām problēmām, pētījumam tika izvirzīti šādi uzdevumi: iegūt radiolokācijas signālus eolos nogulumos iespējami plašā, praktiski lietotā radiolokācijas frekvenču diapazonā, kā arī analizēt signālu iespējamo saistību ar nogulumu fizikālo īpašību izmaiņām.

PĒTĪJUMU TERITORĪJA

Lauka pētījumi norisinājās Valkas novadā, 10 km uz D no Valkas pilsētas, 0,9 km uz DA no Silezera ietekas (1. att.).

Pētījumu teritoriju veido plakans un lēzeni viļņots glaciolimniskais līdzenums, kuru saposmo plaši izplatītas eolās formas vai to masīvi, kā arī upju ielejas. Reljefs izveidojies pēdējā leduslaikmeta beigu posmā, kad Smiltenes un Strenču lokālo sprostezeru un ledāja kušanas ūdeņi pārskaloja Ziemeļvidzemes ledus loba radītās reljefa formas un atstātos nogulumus. Pārskalotais materiāls tika pakļauts vēja

MATERIĀLI UN METODES

Ņemot vērā agrākos eolo nogulumu pētījumos, kur tika izmantota radiolokācijas metode [4,6,10,11], pielietoto metodiku, pētījuma realizēšanai tika izstrādāti metodiski paņēmieni.

Pētījuma vietas izvēle un radiolokācijas profila novietojums

Par pētījumu objektu tika izraudzīta eolo nogulumu veidota reljefa forma (X=619328, Y=6395369; LKS-92), kur iepriekšējos pētījumos [11] bija iegūti daudzsoļi radiolokācijas signāli. Pētījuma vietā ir izveidots smilts karjers, kas atvieglo atsegumu un skatrakumu ierīkošanu, ļaujot vizuāli novērtēt saguluma netraucētību un iegūt pētījuma mērķu sasniegšanai nepieciešamos nogulumu paraugus. Tāpat pētāmajai teritorijai ir iespējams brīvi piekļūt un ierīkot radiolokācijas profilu – to netraucē veģetācija un citi pētījuma realizāciju ierobežojoši faktori.

Līdzīgos pētījumos norādīts, ka, izmantojot radiolokācijas metodi, izteiktākus signālus ir iespējams iegūt, orientējot profilu perpendikulāri eolo nogulumu reljefa formas garenasij [4,11]. Tādēļ konkrētajā pētījumā radiolokācijas profils tika novietots taisnā līnijā, virzienā uz DR.

Profila sākuma un beigu punkti, kā arī punkti, kuros mainījās reljefs, tika atzīmēti dabā kā piketi. Pavisam bija norādīti 9 punkti, kuriem tika noteiktas koordinātas, kā arī uzmērītas augstuma atzīmes un noteikts sniega segas biezums.

Radiolokācijas pētījumi

Pētījumā autori izmantoja gandrīz visas SIA *Radar Systems* izstrādātās antenu sistēmas – 75 MHz, 150 MHz, 300 MHz, 500 MHz, 900 MHz, 1500 MHz un 2000 MHz antenu sistēmu (2. att.).



2. att. Radiolokācijas profilēšana ar dažādām centrālās frekvences antenu sistēmām: A – 150 MHz antenu sistēma, B – 2000 MHz antenu sistēma

Laika intervāls, kurā notika signālu ieraksts, bija iestatīts, izmantojot testa signālu pētījumu teritorijā atsevišķi katrai antenu sistēmai.

Ieraksts tika veikts nepārtraukti, ar ātrumu 56 zondējumi sekundē. Lai dzēstu neinformatīvos signālus, kas saistīti ar nevienmērīgu antenas kustību pa zemes virsmu, tika izmantots zemo frekvenču filtrs, bet saņemtais signāls tika pastiprināts proporcionāli dziļumam, neveicot automātisko signālu summēšanu.

Ar katru antenu sistēmu profils tika veikts abos virzienos. Tālākai apstrādei un interpretēšanai tika izmantotas radarogrammas, kas tika iegūtas, veicot radiolokācijas profilu pret reljefa pacēlumu, jo tādējādi tika nodrošināta iespējami vienmērīga antenas kustība un iegūtais ieraksts bija kvalitatīvāks.

Nogulumu īpašību analīze

Lai noteiktu iespējamo signālu saistību ar nogulumu fizikālo īpašību izmaiņām, tika analizēti tie parametri, kas, pēc citu autoru atklājumiem, var galvenokārt ietekmēt smilts nogulumu dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtību – mitruma daudzums un granulometriskais sastāvs [2,12,13].

Paraugu ievākšanai tika izveidots skatrakums vietā, kur būtu iespējams vizuāli novērtēt saguluma netraucētību un paraugot tieši zem radiolokācijas profila līnijas (3. att.).



3. att. Paraugošanas darbi pētījuma vajadzībām izveidotajā skatrakumā.

Skatrakums tika rakts līdz 4,6 m dziļumam, lai pārbaudītu iespējami lielu griezumdaļu, cik to pieļauj padziļinājuma veidošanas tehniskie un drošības nosacījumi. Tā kā atsegumā netika vizuāli konstatētas, kādas zonas ar nogulumu atšķirībām, atbilstoši pētījuma plānojumam, paraugi tika ievākti pēc vienāda 0,2 m intervāla, tos hermētiski iepakojot.

Lai noteiktu dabiskā mitruma daudzumu paraugos, tika pielietota žāvēšanas – svēršanas metode, granulometriskā

sastāva noteikšanai izmantojot sietu metodi [14], bet vidējo daļiņu izmēru aprēķinot pēc Folka & Warda metodikas [15].

Ņemot vērā to, ka neliela smilts mitruma daudzuma gadījumos, piemēram eolos nogulumos, viss ūdens var atrasties fizikāli saistītā stāvoklī, kurā tam raksturīga atšķirīga dielektriskās caurlaidības vērtība [2,17,18], visiem nogulumu paraugiem, izmantojot formulu (1.1) [18], tika aprēķināts maksimālās iespējamās fizikāli saistītā ūdens daudzuma vērtības. Veicot tālākus aprēķinus, tika pieņemts, ka ūdens molekulas grunts slāņos atrodas brīvā stāvoklī tikai gadījumā, ja kopējais mitruma daudzums pārsniedz maksimālo iespējamo saistītā ūdens daudzumu.

$$V_{sū} = (0,3 - 0,0023M_{>0,05} + 0,005M_{<0,002})100 \quad (1.1)$$

$V_{sū}$ – maksimālais fizikāli saistītā ūdens daudzums (%);

$M_{\geq 0,05}$ – daļiņu daudzums, kas lielākas par 0,05 mm (%);

$M_{< 0,002}$ – daļiņu daudzums, kas mazākas par 0,002 mm (%).

Elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma noteikšana

Lai noteiktu dziļumu, no kura saņemti iegūtie signāli, tika aprēķināts elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums pētītajā griezumā. Tika pieņemts, ka pētījumu teritorijā elektromagnētisko viļņu ātrumu ietekmē tikai vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālās daļas vērtība.

Vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālās daļas vērtības tika aprēķinātas, izmantojot nogulumu paraugu analīžu rezultātus un empīriskā ceļā iegūtas formulas. Šādas empīriskas formulas ļauj pēc nogulumiežus veidojošo komponentu analīzes aprēķināt to kopējo dielektriskās caurlaidības reālās daļas vērtību.

Tā kā smilts nogulumus veidojošie komponenti ir gaiss, minerālās daļiņas (pārsvarā kvarcs) un ūdens, kas sastopams gan brīvā, gan saistītā stāvoklī [16,17], aprēķinos tika izmantotas šo komponentu daudzuma vērtības. Ņemot vērā to, ka Latvijā kvartāra nogulumos smilts frakcijā virs 0,05 mm parasti dominē kvarcs ar laukšpatu piemaisījumu, kas konstatēts arī pētījuma teritorijā [18], grunts minerālo daļiņu dielektriskās caurlaidības koeficienta reālo komponenti var pieņemt kā 5,5, savukārt saistītam ūdenim tā vienāda ar 65, bet brīvā stāvoklī esošam ūdenim 81 [17,19].

Lai aprēķinātu dielektriskās caurlaidības koeficienta reālo komponenti, iespējams pielietot formulas smiltsiežiem (1.2) un vispārīgā veidā nogulumiežiem, ar mitruma daudzumu intervālā no 3 līdz 45% (1.3) [20].

$$\varepsilon' = 3,2 + 1,1W \quad (1.2)$$

ε' – vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente;

W – mitruma daudzums (%).

$$\varepsilon' = 3,3 + 9,3W + 146W^2 - 76,7W^3 \quad (1.3)$$

ε' – vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente;

W – mitruma daudzums (%).

Tāpat gadījumos, kad kopējais mitruma daudzums nepārsniedz vai ir vienāds ar maksimālo fizikāli saistītā ūdens daudzumu, dielektriskās caurlaidības koeficientu var izteikt ar formulu (1.4) [16, 21].

$$\sqrt{\varepsilon'} = \sqrt{\varepsilon'_c} + \left(\sqrt{\varepsilon'_{sū}} - 1\right)W \quad (1.4)$$

ε' – vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente;

ε'_c – cietās fāzes – minerālu dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente;

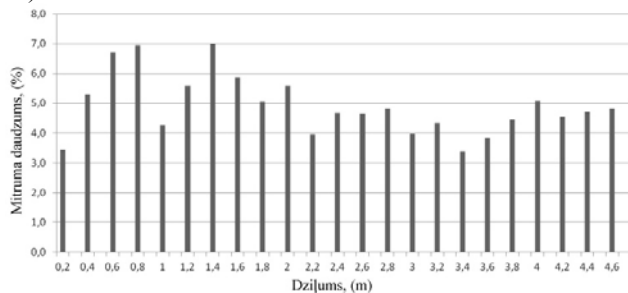
$\varepsilon'_{sū}$ – fizikāli saistītā ūdens dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente;

W – kopējais mitruma daudzums, (%).

REZULTĀTI UN DISKUSIJA

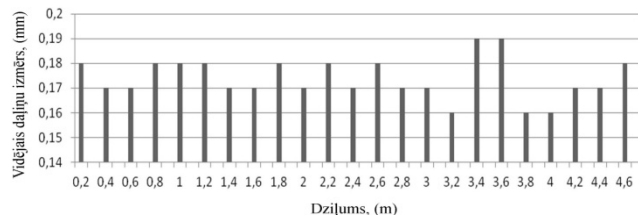
Lai noteiktu, vai saņemto signālu atšķirības ir saistītas ar pielietoto antenu izšķirtspēju, tika pārbaudīts iegūto signālu frekvenču spektrs. Gandrīz visu pētījumā pielietoto antenu sistēmu (izņemot 75 MHz) centrālā frekvence profilēšanas gaitā pazeminājās. Līdz ar to faktiskais frekvenču diapazons, kādā pētījuma gaitā bija iespējams iegūt lielāko daļu signālu, bija robežās no 75 MHz līdz 694 MHz, nodrošinot atbilstošu antenu sistēmu horizontālo un vertikālo izšķirtspēju. Minētā centrālās frekvences pazemināšanās var būt saistīta ar sniega segu, kas profilēšanas gaitā ierobežo tiešu antenas sakari ar nogulumu virsmu. Zinātniskajā literatūrā norādīts, ka gaisa starpkārta starp antenu sistēmu un zondējamo virsmu novirza signālu spektra centrālo daļu uz zemām frekvencēm [13,20], sniegs šajā gadījumā varēja izraisīt līdzīgu efektu.

Mitruma analīžu rezultāti norāda, ka nogulumu dabiskā mitruma daudzums nav liels, variējot no 3,4% līdz 7,0% (4. att.), nevienā gadījumā nepārsniedzot maksimālā fizikāli saistītā ūdens robežu, kas noteikta pēc regresijas sakarības (1.1).



4. att. Šurfa intervālā analizēto paraugu mitruma absolūtās vērtības.

Granulometriskās analīzes rezultāti norāda, ka vidējais graudu izmērs noņemtajos paraugos variē no 0,16 mm līdz 0,19 mm (5. att.), atbilstot tipisku eolo smilšu vidējiem graudu izmēriem [22,23], kā arī izdalāms šādiem nogulumiem raksturīgs neliels, līdz 0,2%, aleirītiskās un māla frakcijas (<0,05 mm) piejaukums paraugos [24,25].



5. att. Vidējais nogulumu daļiņu izmērs.

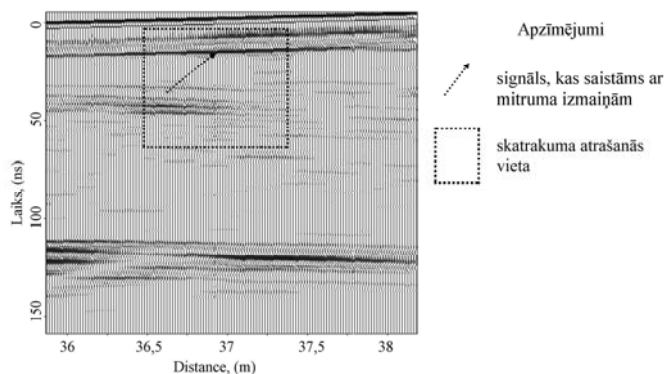
Analizējot iegūtos rezultātus, tieša sakarība starp vidējo nogulumu graudu izmēru un mitruma daudzumu paraugos nav novērojama. Tāda nav arī izdalāma, analizējot paraugu frakcijas, kas smalkākas par 0,05 mm un mitruma daudzumu.

Lai paraugiem aprēķinātu dielektriskās caurlaidības reālās daļas vērtības, iegūtie laboratorijas analīžu dati tika integrēti empīriskās formulās (1.2), (1.3) un (1.4), to rezultāti secīgi variē 6,9–10,9, 3,8–4,6 un 5,1–7,2 robežās. Analizējot iegūtos rezultātus un salīdzinot ar zinātniskajā literatūrā norādītiem eolo nogulumu ar līdzīgu mitrumu dielektriskās caurlaidības reālās daļas vērtību intervāliem [26,27], tie atzīstami par ticamiem. Tādējādi uzskatāms, ka visas iepriekšēji norādītās aprēķinu formulas iespējams pielietot, lai eolo nogulumu paraugiem aprēķinātu dielektriskās caurlaidības reālās daļas vērtības. Noteiktos apstākļos, kad mitruma daudzums ir neliels, ieteicams izmantot formulu (1.4) [16,21], kas ņem vērā fizikāli saistītā ūdens klātbūtni, bet pārējās formulas ((1.2) un (1.3)) var tikt izmantotas rezultātu ticamības kontrolei [20].

Lai radarogrammās izdalītiem signāliem noteiktu dziļumu, kādā tie iegūti, pēc iegūtajām dielektriskās caurlaidības vērtībām tika aprēķināts elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums zondējamajā vidē. Pielietojot formulas (1.2) un (1.3), tas secīgi variē no 9,1 cm/ns līdz 11,4 cm/ns un no 13,9 cm/ns līdz 15,4 cm/ns, savukārt pēc formulas (1.4) vērtības atrodas robežās no 11,2 cm/ns līdz 13,3 cm/ns. Iegūtie rezultāti atbilst publicētajos materiālos norādītajām elektromagnētisko viļņu izplatības ātruma vērtībām sausās smiltīs [2,13,28].

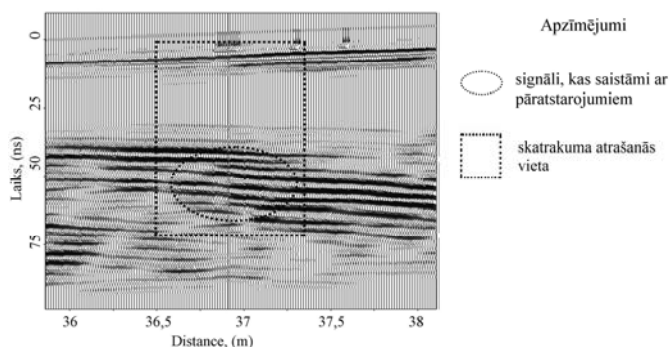
Ja radarogrammās fiksētiem signāliem ir saistība ar nogulumu mitruma daudzuma vai vidējā nogulumu daļiņu lieluma atšķirībām, tad visticamāk tie ir intervāli ar šo parametru krasākajām izmaiņām [13,20]. Konkrētajā pētījumu vietā šādi intervāli mitruma daudzuma izmaiņām ir 0,8–1,00 m, 2–2,2 m dziļumā no zemes virsas, bet vidējā nogulumu daļiņu izmēram 3,2–3,4 m un 3,6–3,8 m posmos.

Signāli, kas varētu atbilst mitruma krasākiem izmaiņu intervāliem, tika identificēti gandrīz visās analizējamās radarogrammās (piemēram, 6. att. 13,6 ns dziļumā), izņemot ar 75 MHz antenu sistēmu realizētajā radarogrammā.



6. att. Atstaroto signālu amplitūdas izmaiņas radarogrammas skatrakuma novietojuma zonā (300 MHz antenu sistēma)

Tomēr minētie signāli nav izteikti. Iespējams, tas skaidrojams ar mitruma daudzuma nelielajām atšķirībām, kuru izdalīšanu apgrūtina salīdzinoši lielākas amplitūdas slīpi orientētu, regulāru signālu klātbūtne (piemēram, 7. att.). Tie analīzes rezultātā atzīti par pāratstarojuma signāliem [2,12,13].



7. att. Atstaroto signālu amplitūdas izmaiņas radarogrammas skatrakuma novietojuma zonā (500 MHz antenu sistēma)

Zinātniskajā literatūrā tiek apskatīta [2,13,14,29] daļiņu vidējā izmēra ietekme uz nogulumu elektromagnētiskām īpašībām, bet gadījumos, kad mitruma daudzums nepārsniedz 5,5%, šī ietekme nav izteikta [30]. Lielākajā daļā pētītā griezuma mitruma daudzums nepārsniedz šo robežu, kā arī tā variācija ģeoloģiskajā griezumā ir maza, iespējams tādēļ radarogrammās signāli, kas būtu saistīti ar granulometrisko izmaiņu atšķirībām, nav izsekojami.

Turpmākos pētījumos uzmanība būtu jāpievērš nogulumu minerālajam un ķīmiskajam sastāvam – kā tas ietekmē nogulumu elektromagnētiskās īpašības. Vairāki autori [31,32,33] ir pauduši viedokli, ka signālus šādā salīdzinoši viendabīgā vidē var izraisīt dzelzs oksīdu un hidroksīdu klātbūtne. Laboratoriskas pārbaudes [30] nav uzrādījušas šādu savienojumu nozīmīgu ietekmi uz smilts dielektriskām īpašībām, taču, veicot radiolokācijas mērījumus, dabā iespējams iegūt atšķirīgus rezultātus [2]. Pētījumos minēts, ka šādi signāli var būt saistīti ar paaugstinātu kvarca pavadošo minerālu, piemēram, laukšpatu, klātbūtni [34]. Šādas zonas identificētas arī pētāmā teritorijā [18].

Nākotnē būtu jāpēta faktori, kas izraisa pāratstarojuma signālu rašanos, kā arī iespējas tos novērst vai minimizēt kvalitatīvu ģeofizikālo datu ieguves procesā.

SECINĀJUMI

Analizējot pētījuma gaitā iegūtos rezultātus, tika izdarīti vairāki secinājumi par radiolokācijas metodes pielietojuma iespējām eolo nogulumu pētījumos. Starp tiem kā galvenie izceļami:

Radiolokācijas zondēšanas pētījumā pielietotās antenu sistēmas pārklāj plašu frekvenču spektra diapazonu. Ar visām izmantotajām antenu sistēmām tika iegūti kvalitatīvi dati, kas ļāva salīdzināt ar dažādām antenu sistēmām iegūtos ģeofizikālos mērījumus. Kvalitatīvākie rezultāti tika iegūti ar 300 MHz antenu sistēmu, līdz ar to turpmākos eolo nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi ieteicams izmantot antenu sistēmu ar centrālo frekvenci 300 MHz.

Pētījuma laikā iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka mitruma daudzuma izmaiņas eolajos nogulumos var tikt identificētas, izmantojot radiolokācijas metodi. Savukārt daļiņu granulometriskā sastāva izmaiņas griezumā salīdzinoši maz ietekmē nogulumu slāņu elektromagnētiskās īpašības, un tās nav iespējams identificēt ar ģeoradaru.

Literatūras avotos minētās elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma vērtības eolajos nogulumos variē salīdzinoši plašā intervālā. Lai būtu iespējams noteikt dziļumu, no kāda iegūti informatīvie signāli, jāaprēķina elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu izvēlētajā pētījuma teritorijā, izmantojot ievāktu nogulumu paraugu laboratorijas analīžu rezultātus. Izmantojot laboratorijas analīžu rezultātus un ar tiem veiktos aprēķinus, tika secināts, ka pētījuma teritorijā nogulumu satur gan brīvo ūdeni, gan saistīto ūdeni. Aprēķinot elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu nogulumu slāņos ar salīdzinoši mazu mitruma daudzumu, būtiski ir ņemt vērā to, ka saistītā ūdens elektromagnētiskās īpašības atšķiras no brīvā ūdens elektromagnētiskajām īpašībām.

Pētījuma laikā tika analizēti iegūtajās radarogrammās identificēto signālu spektri, kas ļāva izdarīt secinājumus par identificēto signālu frekvenču sadalījumu. Ja eolos nogulumus klāj salīdzinoši bieza (40 cm un vairāk) sniega sega, radiolokācijas signāla centrālā frekvence samazināsies. Centrālās frekvences samazinājums nav konstants visām izmantotajām antenu sistēmām. Antenu sistēmām ar augstu centrālo frekvenci ir raksturīgs lielāks samazinājums. Tas ir ticis novērots vairākkārt antenu sistēmām ar atšķirīgu centrālo frekvenci.

PATEICĪBAS

Pētījuma izstrādei tika saņemts finansiāls atbalsts no Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē”, ESF projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē – 2” (Nr. 2011/0054/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/002) un VPP „Vietējo resursu (zemes dziļi, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)” apakšprojekta Nr.1 „Jaunu tehnoloģiju izstrādāšana inovatīvu produktu radīšanai no Latvijas zemes dziļi resursiem (ZEMES DZĪLES)”.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] **Bristow, C.S.** Ground penetrating radar. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Switzer, A.D., Kennedy, D.M. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, 2013, Academic Press, San Diego, CA, vol. 14, Methods in Geomorphology, p. 183 – 194.
- [2] **Sudakova, M.S.** *Dielektrisko mērijumu metodikas izstrāde un pielietošana, izmantojot lauka ģeoradaru laboratorijas apstākļos.* Disertācija doktora grāda iegūšanai fizikāli matemātikas zinātnēs. Maskavas valsts M.V. Lomonosova universitāte, Ģeoloģijas fakultāte, 2009.
- [3] **Bristow, C.S., Augustinus, P.C., Wallis, I.C., Jol, H.M., Rhodes, E.J.** Investigation of the age and migration of reversing dunes in Antarctica using GPR and OSL, with implications for GPR on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 289, p. 30 – 42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.026>
- [4] **Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Rodríguez, I., Sánchez, M.J., Montoya, I.** The internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River Delta (Spain) from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, vol. 68, p. 159 – 170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.11.007>
- [5] **Inmaculada, R.S., García, M.J.S., Montes, I.M., Gómez – Ortiz, D., Crespo, T.M., Raventos, J.S.** Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology*, 2009, vol. 104, p. 238 – 252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.017>
- [6] **Pedersen, K., Clemmensen, L.B.** Unveiling past aeolian landscapes: A ground-penetrating radar survey of a Holocene coastal dunefield system, Thy, Denmark. *Sedimentary Geology*, 2005, vol. 177, p. 57 – 86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.02.001>
- [7] **Beres, M., Haeni, F.P.** Application of ground-penetrating radar methods in hydrogeologic studies. *Groundwater*, 1991, vol. 29, N 3, p. 375 – 386. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x>
- [8] **Gawthorpe, R.L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Leeder, M., Bridge, J.S.** Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. In: North, C.P., Prosser, D.J. (Eds.), *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs*. 1993, Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., vol. 73, p. 421 – 432.
- [9] **Zelčs, V.** *Sedas līdzenums.* Kavacs, G. (red.). Latvijas daba: enciklopēdija, Rīga, Latvijas enciklopēdija, 1998, sēj. 5, lpp. 66 – 68.
- [10] **Buynевич, I., Bitinas, A., Pupienis, D.** Reactivation of coastal dunes documented by subsurface imaging of the Great Dune Ridge, Lithuania. *Journal of Coastal Research*, 2007, vol. 50, p. 226 – 230.
- [11] **Celiņš, I.** Iekšzemes kāpu morfoloģija, iekšējā uzbūve un attīstība Ziemeļvidzemē. Maģistra darbs. Latvijas Universitāte, Rīga, 2012.
- [12] **Finkelšteins, M.I.** (red.). *Zemvirsmas radiolokācija.* Maskava, Radio un sakari, 1994.
- [13] **Izjumovs, S.V., Dručinins, S.V., Voznesenskij, A.I.** *Teorija un metodes ģeoradiolokācijā.* Maskava, Kalnu grāmata, 2008.
- [14] **Lomotadze, V.D.** *Iežu fizikāli-mehāniskās īpašības. Laboratorijas pētījumu metodes.* Ļeņingrada, Nedra, 1990
- [15] **McManus, J.** *Grain size determination and interpretation.* In: Tucker M. E. (ed.). *Techniques in Sedimentology.* Blackwell Science, 1988, p. 63-85.
- [16] **Beļajeva, T.A., Bobrovs, P.P., Ivčenko, O.A., Mandrigina, V.N.** Augsnes saistītā ūdens dielektriskās caurlaidības atkrībe no tā daudzuma. Mūsdienu problēmas distancētajā zemes zondēšanā no kosmosa. Maskava, Kosmisko pētījumu institūts RAN, 2006
- [17] **Bojarskijs, D.A., Tihonovs, V.V.** Saistītā ūdens ietekme uz mitru un sasalušu grunšu dielektrisko caurlaidību. Maskava, Kosmisko pētījumu institūts RAN, 2003, 48 lpp.
- [18] **Kaliņska, E., Kalm, V., Nartišs, M., Celiņš, I., Gorchach, A.** Textural variability of the selected coversand deposits in Latvia – preliminary results. In: **Zhirov A., Kuznetsov V., Subetto D., Thiede J.** (eds), "Geomorphology and Palaeogeography of Polar Regions": Proceeding of the Joint Conference "Geomorphology and Quaternary Palaeogeography of Polar Regions", Symposium "Leopoldina" and the INQUA Peribaltic working group Workshop. 2012, St.-Petersburg State University, Russia, p. 427 – 429.
- [19] **Mironova, V.L., Bobrovs, P.P., Kondratjeva, O.V., Repins, A.V.** Dažādu veidu augšnes mitruma kompleksās dielektriskās caurlaidības mērījumi mikroviļņu diapazonā. Elektr. tēžu krājums. *Krievijas zinātniskā konference „Grunts slāņu zondēšana ar sintizētās apertūras radariem”* 2010, 6 – 10 Septembris, Ulan – Ude, lpp. 344 – 355.
- [20] **Vladovs, M.L., Staravoitovs, A.V.** *Levads ģeoradiolokācijā.* Maskava, Maskavas valsts universitāte, 2004.
- [21] **Komarovs, S.A., Mironovs, V.L.** *Augsnes zondēšana ar mikroviļņiem.* Novosibirskā, SO RAN, 2000
- [22] **Ahlbrandt, T.S.** *Textural parameters of eolian deposits.* **Laity, J.** (Eds), *Deserts and Desert Environments.* 1979, Oxford, Wiley-Blackwell, p. 191 – 192.
- [23] **Ganešins, G.S.** (red.). Metodiski ieteikumi kvartāra nogulumu pētījumos un dokumentēšanā. *Ļeņingrada, Nedra, 1987.*
- [24] **Hjulstrom, P.** *The problem of the geographic location of wind blown silt. An attempt of explanation.* *Geografiska Annaler*, 1955, p. 1 – 2.
- [25] **Sundborg, A.** Meteorological and climatological conditions for the genesis of eolian sediments. *Geogr. Annaler*, 1955, p. 1 – 2.
- [26] **Delaney, A.J., Arcone, S.A.** Laboratory measurements of soil electric properties between 0.1 and 5 GHz. *USA CRREL.Rep.*, 1982, vol. 82, N 10, p. 8.
- [27] **Hunter, L., Delaney, A., Lawson, D., Les Davis.** Downhole GPR for highresolution analysis of material properties near Fairbanks, Alaska. *Ground penetrating radar in Sediments.* 2003, p. 275 – 285.
- [28] **Finkelšteins, M.I.** (red.). *Slāņainu grunšu radiolokācijas pētījumi.* Maskava, Padomju radio, 1977.
- [29] **Guillemoteau, J., Bano, M., Dujardin, J.R.** Influence of grain size, shape and compaction on georadar waves: example of an Aeolian dune. *Geophysical Journal International*, 2012, vol. 190, N 3, p. 1455 – 1463. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05577.x>
- [30] **van Dam, R.L.** *Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment.* PhD Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands, 2001.
- [31] **van Dam, R.L., Schlager, W.** Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, 2000, vol. 47, N 2, p. 435 – 449. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00304.x>
- [32] **Josh, M., Lintern, M. J., Kepic, A.W., Verrall, M.** Impact of grain-coating iron minerals on dielectric response of quartz sand and implications for ground-penetrating radar. *Geophysics*, 2011, vol. 76, N 5, p. 27 – 34. <http://dx.doi.org/10.1190/geo2010-0321.1>
- [33] **Klein, K., Santamarina, J.C.** Ferromagnetic inclusions in geomaterials: implications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, vol. 126, N 2, p. 167 – 179. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:2\(167\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:2(167))
- [34] **Adetunji, A.Q.** *Mapping the Internal Structure of Sand Dunes in the Jafurah Sand Sea of Eastern Saudi Arabia using Ground Penetrating Radar.* Requirements for the degree of Master of Science in Geophysics. KingFahd University of Petroleum and Minerals, 2008.

Juris Vībāns, MSc.geol. 2013.

His major fields of study are ground penetrating radar and vertical electrical sounding technology

Address: Martas Rinkas 3-29, Riga, LV 1015, Latvia.

Phone +37128789999

e-mail: juris.vibans@inbox.lv

Jānis Karušs, MSc.geol. 2012, Dr.geol. stud.

Current position: Scientific assistant of the Department of Applied geology at the Faculty of Geography and Earth Sciences at the University of Latvia. His major fields of study are ground penetrating radar and its application possibilities in peatland and clay deposits

Address: Alberta 10, Riga, LV 1010, Latvia.

e-mail: janis.karus@inbox.lv

Juris Vībāns, Jānis Karušs. Ground Penetrating Radar Application to Studies of the Aeolian Deposits.

This research is focused on ground penetrating radar application possibilities in an aeolian deposit research. The goal of the research was to obtain ground penetrating radar signals in aeolian deposits using antenna systems that cover wide range of frequencies and also to correlate the obtained signals with a variation of deposit physical properties.

The ground penetrating radar profiling was carried out in inland dunes that are located in Valka region using antenna systems that cover a wide range of frequencies (75–2000 MHz). In this paper the moisture analysis and grain size analysis results of the deposit samples are included. The

ground penetrating radar signal propagation speed in the geological section was calculated. Dielectric permittivity values of the deposit samples were calculated using laboratory analysis results and empirical formulas. After analysing the calculated dielectric permittivity values, it was concluded that the obtained values are consistent with dielectric permittivity values of aeolian deposits with the similar moisture content that are published in scientific literature. In this research the obtained results show that it is possible to acquire informative signals in aeolian deposits with all antenna systems that were used. The highest quality results were acquired using 300 MHz antenna system, hence in future aeolian deposit research it is advisable to use this antenna system. It was concluded that it is possible to detect moisture content variations in the geological section using a ground penetrating radar. Variations of particle grain size distribution in the geological section were not detected by the ground penetrating radar, which indicates that the particle grain size distribution has a relatively small effect on aeolian deposit electromagnetic properties. The analysis of the laboratory results and calculations show that deposits of the research area contain free water and bound water molecules. When calculations of electromagnetic wave propagation speed in deposit layers with low moisture content are carried out, it is important to take into account that electromagnetic properties of bound water differ from those of free water.

Юрис Вибанс, Янис Карушс. Применение георадиолокационного метода при исследованиях эоловых отложений.

В научной работе проанализированы возможности применения георадиолокационного метода при исследованиях эоловых отложений. Целью исследования было получение сигналов в широком, практически используемом диапазоне частот (75–2000 МГц), анализируя их возможную связь с зонами изменений физических свойств горной породы.

В расположенной на севере Латвии (Валкский край) территории распространения континентальных дюн осуществлено радиолокационное профилирование, также собраны пробы эоловых отложений. Собранный материал проанализирован на гранулометрический состав и процент естественной влажности. Полученные лабораторные данные при помощи эмпирических формул позволили вычислить действительную часть диэлектрической проницаемости образцов с последующим расчётам скорости распространения радиолокационного сигнала в интервале исследуемого геологического разреза.

Хорошее совпадение полученных данных с данными, указанными в научной литературе, при сходных исследованиях, позволяет считать их надежными. В результате георадиолокационного профилирования получены информативные сигналы со всеми использованными антенными системами, что позволяет оценить их в целом. Самые хорошие результаты получены при использовании 300 МГц антенной системы, тем самым её рекомендуется использовать при похожих геологических исследованиях. Был сделан вывод, что зоны в горной породе с разной степенью влажности могут быть идентифицированы, в то же время изменение гранулометрического состава вносит относительно небольшой вклад в изменение общих электромагнитных свойствах горной породы и они не могут быть определены с помощью георадара. По результатам лабораторных испытаний и расчетов был сделан вывод, что эоловые отложения на территории исследования содержат как связанную, так и свободную воду. Это важно учитывать при расчёте скорости распространения радиолокационного сигнала, так как электромагнитные свойства связанной воды отличаются от воды, которая находится в свободном состоянии.