

Mālainās gruntīs iegūto radiolokācijas signālu analīze

Jānis Karušs¹, Valdis Segliņš², Daiga Pipira³, ¹⁻³ *University of Latvia*

Kopsavilkums. Pētījums ir veltīts radiolokācijas metodes attīstības iespēju novērtējumam. Tiek sniegts pētījumu teritorijas ģeoloģiskās uzbūves apraksts, izmantotās pētījumu metodikas apraksts darbā ar 500, 750 un 900 MHz antenu sistēmām, analizēts grunšu granulometriskais sastāvs, dabiskais mitrums. Secināts, ka mālainu iežu elektromagnētiskās īpašības galvenokārt atkarīgas no mitruma daudzuma un daļiņu granulometriskā sadalījuma un ka metodei ir visai nozīmīgi ierobežojumi pētījumos mālainās gruntīs.

Atslēgas vārdi: ģeoradars, ģeofizika, Liepas māla atradne, mālainas gruntis.

ĪEVADS

Zinātniskajā literatūrā, kā arī senākos speciālās literatūras avotos par grunts radiolokācijas pētījumiem [1,2,3,4,5] tiek īpaši izcelts, ka radiolokācijas metodes izmantošana mālainās gruntīs ir neiespējama vai ir ļoti apgrūtināta. Minētais izriet no metodes darbības pamatprincipiem un no tā, ka mālainām gruntīm ir salīdzinoši augsta elektrovadītspēja. Tomēr pētījuma autori uzskata, ka šādi pieņēmumi un viedoklis nav korekts, jo pietiekoši detalizēti nav aprakstīti pētījumi, kas šo viedokli apstiprinātu. Tāpat literatūrā paustais viedoklis visbiežāk balstās uz atsevišķiem neveiksmīgiem eksperimentiem un teorētiskiem apsvērumiem, pieņēmumiem, retāk – arī aprēķiniem.

Radiolokācijas metode tiek attīstīta jau vairākus gadu desmitus, bet joprojām nekur pasaulē nav izstrādāta lauka darbu standartizēta metodika, kā arī kamerālo datu apstrādes metodika, pat paņēmieni un procedūras nav izstrādātas – tās līdz šim vienmēr tiek pielāgotas konkrētā pētījuma vajadzībām [5]. Arī metodes izmantošanas iespējas pilnībā nav apzinātas, kas arī norāda darba aktualitāti, ko izceļ un īpaši akcentē citi pētnieki [1,6].

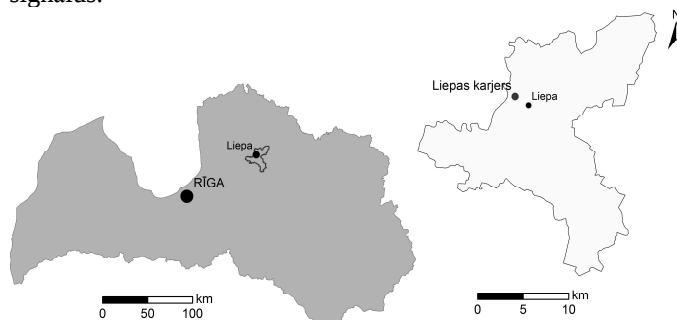
Tādēļ, ņemot vērā iepriekšminēto, pētījuma mērķis ir analizēt radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas mālainu iežu un nogulumu pētījumos. Lai realizētu pētījumu, bija nepieciešams izstrādāt atbilstošu pētījumu metodiku, noteikt tās grunts fizikālās īpašības, kas galvenokārt nosaka grunts elektromagnētiskās īpašības, un atrast optimālos aparātūras iestatījumus radiolokācijas atstarotā signāla iegūšanai mālainās gruntīs, kā arī analizēt iegūtos rezultātus.

PĒTĪJUMU TERITORĪJA

Pētījums tika realizēts Priekuļu novada teritorijā – Liepas māla karjerā (1 att.), bet radara darbības un iestatījumu kontroles un pārbaūžu pētījumi arī objektos citviet Latvijā.

Karjerā atsedzās augšdevona Franas stāva Gaujas reģionālā stāva (D₃g) Lodes svītas nogulumu, kas ir detalizēti pētīti, un

iepriekšējie pētījumi norādīja uz iespējam iegūt atstarotos signālus.



1.att. Pētījumu teritorijas novietojums

Ģeoloģiskā griezumā Liepas karjerā atsedzas visai sarežģīta aleirītu, mālu un smilšakmeņu slāņkopa, kas satur arī savdabīgu konkrēciju kompleksu (bieži sastopamas fosfātu konkrēcijas ar aptuveni 7 cm lielu diametru). Karjerā kopumā dominē aleirolīti – tie ir sarkani, masīvi, sastopami arī zaļganpelēki plankumi un joslas. Sadzīviski šos mālus bieži vien sauc par liesajiem, sarkanajiem māliem, bet kontaktzonā ar smilšakmeņu slāņiem tie veido 0,2 – 0,4 m biezas zaļganpelēkas atdzelžošanās joslas. Šādas joslas ir arī aleirolītu slāņu kontaktu vietās, kur ieži satur mazāk māla daļiņas. Tādējādi Liepas karjera atsegtajā slāņkopā sastopamas vairākas vietas, kuras veido slāņi ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām, kas konstatējam vizuāli, kā arī laboratorisko pētījumu metodēm.

MATERIĀLI UN METODES

Pētījumā izmantots SIA Radar Systems Latvijā ražotais ģeoradars *Zond-12e* kopā ar trīs dažādām ekranētu antenu sistēmām – 500 MHz, 750 MHz un 900 MHz.

Radiolokācijas pētījumiem tika izmantota 900 MHz antenu sistēma, jo iepriekšējos pētījumos Liepas karjerā informatīvu signālu izdevās iegūt ar šo antenu sistēmu. Ņemot vērā to, ka vietās, kur sastopama grunts ar augstu elektrovadītspēju, ieteikts izmantot antenu sistēmu ar salīdzinoši zemu frekvenci [5] un to, ka antenu sistēmas ar ļoti zemu frekvenci (35 MHz – 150 MHz) nesniegtu pētījuma realizācijai nepieciešamo izšķirtspēju, tika izvēlēts izmantot 500 MHz antenu sistēmu. Apstrādājot radarogrammas, kas tika iegūtas pētījumu teritorijā, izmantojot 900 MHz antenu sistēmu, tika konstatēts, ka informatīvā signāla frekvenču spektra intervāls ir aptuveni 400 MHz. Tādēļ detalizācijas un kontroles pētījumos izvēlētie profili tika atkārtoti veikti, izmantojot tieši 750 MHz antenu sistēmu.

Tika izvēlēta profilēšanas metode [1], kas ļauj veikt nepārtrauktu signālu ierakstu un izvēlēto profilu tieši sasaistīt ar urbumu un mākslīgi veidoto atsegumu ģeoloģiskajiem datiem.

Radiolokācijas profili tika izvietoti vietās, kur vizuāli tika identificēti vairāki slāņi un kur slāņu sagulums nebija subhorizontāls. Radiolokācijas profili netika izvietoti vietās, kur slāņu sagulums ir subhorizontāls, jo radarogrammās, kas ierakstītas virs subhorizontāli iegulošiem slāņiem ar augstu elektrovadītspēju, ir salīdzinoši grūti identificēt signālus, kas saistīti ar slāņu robežām. Tas ir saistīts ar to, ka, veicot radiolokācijas zondēšanu vidēs ar augstu elektrovadītspēju, ierakstītajā radarogrammā bieži sastopami subhorizontāli neinformatīvi signāli, kurus ir grūti vai pat neiespējami atšķirt no informatīviem signāliem, kas saistīti ar subhorizontāli iegulošiem slāņiem.

Nemot vērā iepriekšminēto, vienu radiolokācijas profilu novietoja virs subhorizontāli gulošiem slāņiem, lai būtu iespējams novērtēt iespējas atšķirt subhorizontālus informatīvus signālus no subhorizontāliem neinformatīviem signāliem mālainās gruntīs (2. att.).



2.att. Profila ieraksta vieta virs subhorizontāli iegulošiem slāņiem (6. profils)

Tā kā bieži vien atstarotā signāla, kas saistīts ar iežu ne-subhorizontāli gulošu slāņu robežām, amplitūda ir atkarīga no radiolokācijas profilēšanas relatīvā virziena pret robežu, izvēlētie profili tika ierakstīti, divas reizes ierakstu veicot, ejot pretējos virzienos. Kā arī radiolokācijas profili tika orientēti aptuveni perpendikulāri vizuāli identificējamu robežu krituma azimutam.

Veicot radiolokācijas profilēšanu, vizuāli tika novērtēts, vai notiek radarogrammas ieraksts, kā arī, pēc visu izvēlēto profilu ierakstīšanas, selektīvi tika izvēlētas vairākas radarogrammas, kurām tika veikta pirmapstrāde. Šāda procedūra ļauj savlaicīgi atpazīt nekvalitatīvus ierakstus un savlaicīgi atkārtot pētījumus.

Radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūtie signāli, kas saistīti ar slāņu elektromagnētisko īpašību robežām, tika sasaistīti ar slāņu fizikālajām īpašībām, izmantojot lauka darbos ievāktajiem paraugiem veikto laboratorijas analīžu rezultātus un ierīkoto skatrakumu griezumus. Nemot vērā to, ka radiolokācijas metode ir salīdzinoši jutīga, griezuma ģeoloģiskās uzbūves precizēšanai bija nepieciešamas izveidot skatrakumus, jo urbšanas metodes precizitāte attiecībā pret noteikto ģeoloģisko robežu atrašanās vietu griezumā ir nav

pietiekami augsta. Skatrakumi tika rakti vietās, kur viennozīmīgi identificējams informatīvais signāls bija saņemts pēc vismazākās laika aiztures – ar to saistītā slāņu robeža atrodas vistuvāk zemes virsai.

Zināms, ka iežu elektriskās īpašības ir atkarīgas no to minerālā sastāva, mitruma daudzuma un gāzveida komponentes. Kopumā gan iežu vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā komponente, gan elektromagnētisko viļņu disipācija palielinās, pieaugot iežu mitrumam un mālainumam [5]. Savukārt elektromagnētiskajiem viļņiem atstarojoties un lūstot uz slāņu robežām, svarīgi ir ņemt vērā, ka no robežvirsmas atstarotā signāla stiprums ir atkarīgs no slāņu vides dielektrisko caurlaidību atšķirībām (jo slāņu elektriskās īpašības atšķirīgākas, jo lielāka izstarotā signāla daļa atstarojas no šo slāņu robežvirsmas). Tāpat, ja pagulslāņa kompleksā vides dielektriskā caurlaidība būs lielāka par pārsedzošā slāņa komplekso vides dielektrisko caurlaidību, atstarotais signāls būs pretējā fāzē ar izstaroto signālu. Šī salīdzinoši sen izstrādātā teorija par elektromagnētisko viļņu izplatīšanās likumsakarībām dielektriskā vidē tiek izmantota par pamatu radiolokācijas pētījumiem arī mūsdienās [6].

Nemot vērā iepriekšminēto, tika pieņemts, ka radarogrammās identificētie informatīvie signāli ir saistīti ar izteiktām mitruma daudzuma izmaiņām griezumā šaurā intervālā – signāls saistīts ar robežu starp diviem slāņiem, kuriem ir izteiktas mitruma daudzuma atšķirības. Kā otra hipotēze tika pieņemta informatīvo signālu saistība ar salīdzinoši krasām iežu veidojošo daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņām griezumā – signāls saistīts ar robežu starp diviem slāņiem, kuriem ir izteiktas daļiņu granulometriskā sadalījuma atšķirības. Lai šādas robežas būtu iespējams identificēt no ierīkotajiem skatrakumiem, tika noņemti paraugi dabiskā mitruma daudzuma noteikšanai ar svara metodi (vēlāk pārrēķinot kā ūdens tilpuma daudzumu, %) un daļiņu granulometriskā sastāva noteikšanai (izmantojot kombinēto sietu-pipetes metodi). Jau pētījuma sākuma fāzē tika prognozēts, ka, analizējot dabiskā mitruma daudzuma un grunts daļiņu granulometriskā sastāva izmaiņas griezumā, tiks identificēti vairāki intervāli, ar kuriem, iespējams, ir saistīts iegūtais informatīvais signāls, kā arī šie intervāli būs plaši izklaidēti griezumā. Lai būtu iespējams izdalīt intervālus, ar kuriem visticamāk ir saistīts informatīvais signāls, izmantojot grunts slāņiem aprēķinātās vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtības un tām atbilstošās elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma vērtības, kā arī laika aizturi, pēc kuras tika saņemts informatīvais signāls skatrakumam atbilstošajā vietā, tika aprēķināts dziļums, no kāda informatīvais signāls ir saņemts.

Izmantojot formulas (1) un (2) [5], katram grunts slānim tika aprēķinātas divas dielektriskās caurlaidības koeficienta reālās daļas vērtības un, pieņemot, ka grunts cietās fāzes dielektriskās caurlaidības koeficients ir 4,6 (aptuveni atbilst kvarcam), tām atbilstošās elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma vērtības.

$$\varepsilon'_\ell = \prod_{i=1}^n (\varepsilon'_i)^{\Phi_i} \quad (1)$$

ε'_ℓ - ekvivalentā vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā daļa;

ε'_i - maisījuma komponenta vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā daļa;

Φ_i - maisījuma komponenta aizņemtā tilpuma daļa.

$$\varepsilon'_\ell = 3,03 + 9,3W + 146W^2 - 76,7W^3 \quad (2)$$

ε'_ℓ - ekvivalentās vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā daļa;

W - grunts mitruma tilpuma daļa.

Tika pieņemts, ka reālās vērtības atrodas intervālos starp aprēķinātajām vērtībām. Rezultātā, katram skatrakumam tika noteiktas griezumā intervāla robežas, kurā atrodas ar informatīvo signālu saistītā robeža.

Ņemot vērā to, ka daļā no formulām dielektriskās caurlaidības koeficienta reālā daļa tiek aprēķināta, izmantojot grunts fāžu tilpuma daļu attiecības, to noskaidrošanai no izveidotajiem skatrakumiem tika noņemti grunts monolīti (augstums 5,1 cm, diametrs 4,99 cm).

RADIOLOKĀCIJAS PĒTĪJUMS

Pētījuma pirmajā posmā radiolokācijas profilēšana tika veikta, izmantojot 500 MHz un 900 MHz antenu sistēmas. Ieraksts tika veikts, nepārtraukti fiksējot katru impulsu un izmantojot stipru frekvenču filtru. Zondējumi tika veikti ik pēc 1 cm. Distances fiksēšanai tika izmantots ar iekārtu savienojams odometrs. Ieraksts tika veikts līdz 100 ns laika aiztūrei, kas atbilst 3 m dziļumam, pieņemot, ka grunts pētījumu teritorijā ir mitrs māls, kuram atbilstošais dielektriskās caurlaidības koeficients ir 25. Kopumā tika ierakstītas 24 radarogrammas. Visos gadījumos ieraksts bija kvalitatīvs un iegūtās radarogrammas bija iespējams izmantot pētījuma realizācijai.

Otrajā pētījuma posmā izvēlētajās detalizēto pētījumu vietās tika veikta radiolokācijas profilēšana ar 750 MHz antenu sistēmu. Izvēlētie profili tika ierakstīti sešas reizes. Veicot profilēšanu, tika izmantoti trīs dažādi iekārtas iestatījumi – automātiskā zondējumu summēšana netiek veikta, automātiski tiek summēti divi zondējumi, automātiski tiek summēti četri zondējumi. Izvēlētie profili tika ierakstīti, izmantojot katru iekārtas iestatījumu veidu, divas reizes, ierakstu veicot, ejot pretējos virzienos. Ieraksts tika veikts nepārtraukti ar ātrumu 80 zondējumi sekundē, izmantojot stipru frekvenču filtru. Ieraksts tika veikts līdz 100 ns laika aiztūrei, kas atbilst 3 m dziļumam, pieņemot, ka grunts pētījumu teritorijā ir mitrs māls, kuram atbilstošais dielektriskās caurlaidības koeficients ir 25. Distances fiksēšanai tika izmantoti profilu galapunktos ierīkotie piketi, to koordinātas tika noteiktas instrumentāli, kopumā tika ierakstītas 18 radarogrammas.

Visos radiolokācijas profilos un tajos fiksēto signālu pārbaudes skatrakumos tika iegūti rezultāti, kas ļāva droši

atpazīt slīpi krītošus dažāda sastāva māla slāņus un radarogrammās identificētos signālus korelēt ar izmaiņām grunts dabiskajā mitrumā un granulometrisko frakciju sadalījumā. Salīdzinoši netipiski rezultāti tika iegūti 5. profilā, kas turpmāk tiks apskatīts detalizētāki.

Ņemot vērā iegūtos radiolokācijas rezultātus, pie piektā radiolokācijas profila 8,1 m attālumā no profila sākumpunkta un aptuveni 70 cm uz sāniem no profila līnijas, tika izveidots 3. skatrakums (3. att.).



Apzīmējumi

1. - profila sākumpunkts
2. - profila beigu punkts



- Skatrakuma novietojums

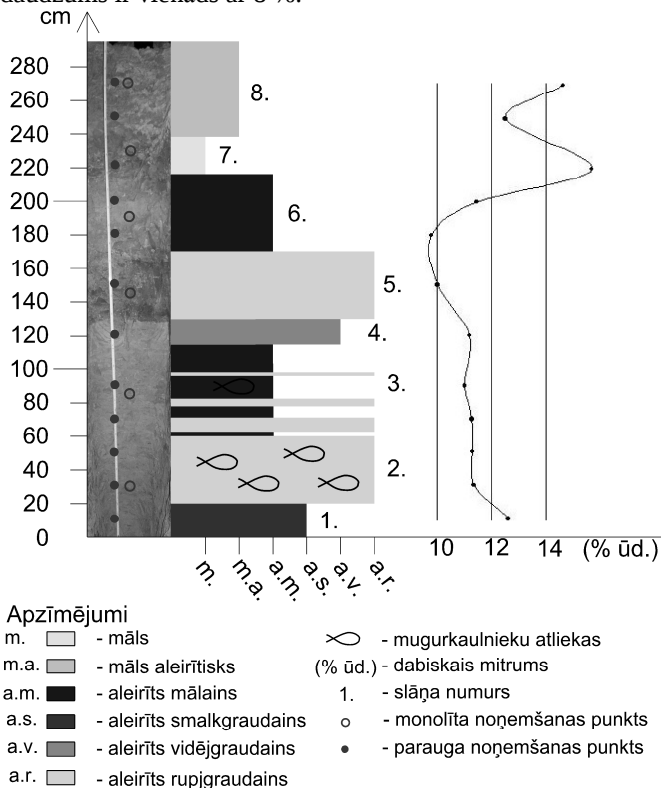
3.att. 3. skatrakuma novietojums pie 5. radiolokācijas profila

Izvēlētajā skatrakuma novietojuma vietā radarogrammā identificētais informatīvais signāls tika saņemts pēc 34 ns laika aiztūres, kas atbilst 2,95 m dziļumam, pieņemot, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficients ir vienāds ar 3. Ņemot vērā šo aprēķinu, skatrakums tika rakts līdz 3 m dziļumam un tajā tika atsegti 8 atšķirīgi mālainu iežu slāņi (4. att.).

Skatrakuma pamatnē pirmo izdalīto slāni veido smalkgraudains aleirolīts zilganā krāsā un slāņa dabiskais mitrums aptuveni 12,6 %. Otro slāni veido rupjgraudains aleirolīts gaiši zilganā krāsā, slānī sastopamas ļoti daudz mugurkaulnieku atliekas. Slāņa dabiskais mitrums aptuveni 11,3 %, bet no slāņa noņemtajā monolītā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 1 %. Trešo slāni veido rupjgraudaina aleirolīta un mālaina aleirolīta slānīšu mija, virzienā uz leju slānis paliek rupjgraudaināks. Robeža starp trešo un otro slāni pakāpeniska. Slānī sastopamas mugurkaulnieku atliekas. Slāņa dabiskais mitrums aptuveni 11,2 %, bet no slāņa noņemtajā monolītā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 7 %.

Ceturto slāni veido vidēji graudains aleirolīts zilganā krāsā, slāņa dabiskais mitrums aptuveni 11,2 %. Piekto slāni veido rupjgraudains aleirolīts sarkanā krāsā. Slāņa dabiskais mitrums aptuveni 10 %, bet no slāņa noņemtajā monolītā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 9 %. Sesto slāni veido mālains aleirolīts pelēkā krāsā. Slāņa dabiskais mitrums virzienā uz augšu pieaug no 9,8 % līdz 11,5 %, bet no slāņa noņemtajā monolītā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 15 %. Septīto slāni veido māls sarkanīgā krāsā, slāņa dabiskais mitrums aptuveni 15,7 %, bet no slāņa noņemtajā monolītā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 9 %.

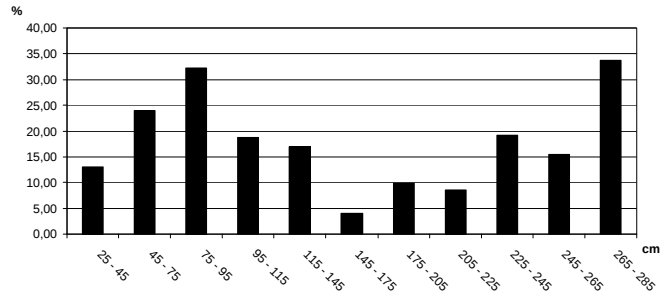
Astoto slāni veido aleirītiski māli pelēkā krāsā. Rokot slānis drūp – lūst, veidojot gabalus ar apmēram 3 cm diametru. Slāņa dabiskais mitrums virzienā uz augšu pieaug no 12,5 % līdz 14,6 %, bet no slāņa noņemtajā monolitā konstatētais gāzes daudzums ir vienāds ar 8 %.



4.att. 3. skatrakuma ģeoloģiskais griezumš

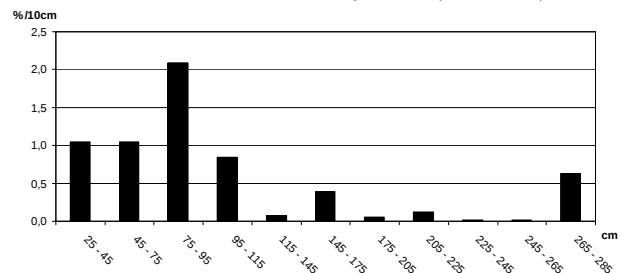
Atsegtais un pētītais ģeoloģiskais griezumš vizuāli, kā arī pēc raksturoto slāņu īpašībām ir pietiekami kontrastains, lai varētu tikt sagaidīti uzskatāmi radiolokācijas signālu ieraksti.

No 3. skatrakuma tika noņemti 12 paraugi, kuriem laboratorijas apstākļos tika veiktas granulometrijas un mitruma daudzuma analīzes. Kopumā granulometriskā sadalījuma izmaiņas griezumā atsevišķos griezumā intervālos variē no 3,9 % līdz 33,7 %, bet griezumā ir identificējami divi intervāli, kuros daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņas ir salīdzinoši lielas - intervāls no 75 cm līdz 95 cm dziļumam un intervāls no 265 cm līdz 285 cm dziļumam (5. att.). Līdz ar to, ja iegūtais informatīvais signāls būtu saistīts ar daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņām griezumā, tad visticamāk tas būtu saistāms ar vienu no šiem intervāliem. Vēl griezumā ir iespējams izdalīt dažus intervālus, kur daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņas arī ir salīdzinoši lielas - intervāls no 45 cm līdz 75 cm dziļumam, intervāls no 95 cm līdz 115 cm dziļumam, intervāls no 225 cm līdz 245 cm dziļumam (sk. 5. att.).



5.att. Daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņas 3. skatrakuma griezumā.

Absolūtās dabiskā mitruma daudzuma izmaiņu intensitātes vērtības 3. skatrakuma ģeoloģiskajā griezumā variē intervālā no 0 %/10cm līdz 2,1 %/10cm (6. att.). Intervālā no 75 cm līdz 95 cm dziļumam vērojama vislielākā mitruma daudzuma izmaiņu intensitāte (sk. 6. att.). Līdz ar to, ja iegūtais informatīvais signāls būtu saistīts ar mitruma izmaiņām griezumā, tad, visticamāk, tas būtu saistāms ar šo intervālu. Vēl griezumā ir iespējams izdalīt vairākus pētītā ģeoloģiskā griezumā intervālus, kur mitruma daudzuma izmaiņu intensitāte arī ir salīdzinoši augsta - intervāls no 25 cm līdz 75 cm dziļumam, intervāls no 95 cm līdz 115 cm dziļumam, intervāls no 265 cm līdz 285 cm dziļumam (sk. 6. att.).

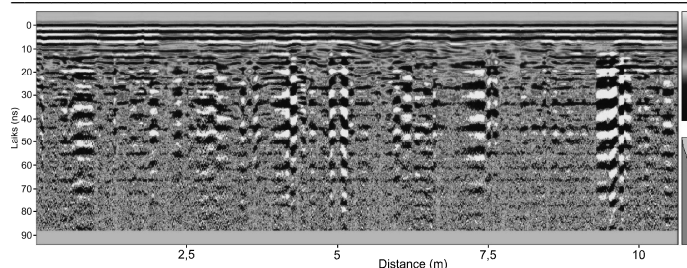


6.att. Dabiskā mitruma daudzuma izmaiņu intensitāte 3. skatrakuma griezumā

No 3. skatrakuma tika noņemti seši grunts monolīti, kuriem tika veiktas laboratorijas analīzes. Izmantojot laboratorijas analīžu rezultātus, tika aprēķinātas vides dielektriskās caurlaidības koeficienta reālās daļas vērtības visiem grunts monolītiem un tām atbilstošās elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma vērtības. Ātruma atšķirības visos 3. skatrakuma izdalītajos slāņos ir aptuveni 2,2 cm/ns. Izmantojot formulu (1), noteiktās ātruma vērtības variē intervālā no 9,6 cm/ns līdz 10,7 cm/s, bet, izmantojot formulu (2), intervālā no 7,2 cm/ns līdz 9,1 cm/ns.

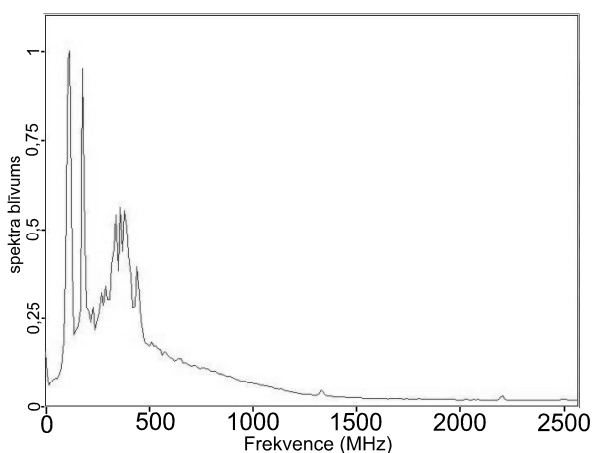
Iegūtās radarogrammas sagatavošana analīzei

Radarogrammā (5-2-900) kopumā vērojami daudzi signāli ar salīdzinoši zemu frekvenci (centrālā frekvence 107 MHz). Intervālos ap 4,15 m, 5,02 m, 7,35 m un 9,48 m atzīmēm šiem signāliem ir raksturīga salīdzinoši liela amplitūda. Palielinoties laika aizturei, signāli nedaudz pavājinās. Radarogrammas pirmajās 8 ns vērojami spēcīgi subhorizontāli signāli, kas visticamāk ir saistīti ar robežu gaiss – grunts. Aptuveni pēc 50 ns laika aiztures ierakstītie signāli kļūst sadrumstaloti un atsevišķu signālu identificēšana ir apgrūtināta (7. att.).



7.att. Radarogramma 5-2-900 pirms apstrādes.

Iegūtās radarogrammas kopējais signālu frekvenču spektrs ir salīdzinoši plats. Frekvenču spektra sadalījuma forma ir tuva normālsadalījumam ar centrālo frekvenci 358 MHz. Frekvenču spektrā vērojami vairāki lokāli maksimumi, no kuriem trīs ir īpaši spēcīgi. Tiem atbilstošās frekvences ir 112 MHz, 178 MHz un 361 MHz (8. att.).



8.att. Radarogrammas 5-2-900 kopējais spektrs.

Tālākai analīzei no frekvenču spektra tika izdalīts intervāls no 41 MHz līdz 296 MHz. Šis intervāls tika izdalīts, jo šajā frekvenču spektra intervālā atrodas divi izteikti lokālie maksimumi (lokālajiem maksimumiem atbilstošās frekvences ir 112 MHz un 178 MHz), kuri neiekļaujas kopējā frekvenču spektra normālsadalījuma formā. Izdalītajam frekvenču intervālam atbilstošie signāli kopumā sastopami visā radarogrammā un tiem ir raksturīga salīdzinoši liela amplitūda.

Signāli ar vidējo frekvenci 108 MHz ir sastopami šaurās joslās visā radarogrammas garumā. Šiem signāliem ir īpaši liela amplitūda intervālos ap 0,75 m, 4,17 m, 5,06 m, 7,35 m un 9,5 m atzīmēm. Šie signāli sastopami visā laika aiztures intervālā ar salīdzinoši nemainīgu amplitūdu. Minētie signāli nesniedz informāciju par grunts saguluma apstākļiem un grunts elektromagnētisko īpašību sadalījumu, tāpēc tie tiek uzskatīti par neinformatīviem un tiek izslēgti no turpmākās radarogrammas analīzes.

Vēl šim frekvenču spektra intervālam atbilst subhorizontāli signāli, kas sastopami visā radarogrammas garumā un visā laika aiztures intervālā un šādi signāli ir raksturīgi visām mālainām gruntīm ar augstu elektrovadītspēju, arī šie signāli ir uzskatāmi par neinformatīviem.

Līdzīga detalizēta analīze tika veikta arī frekvenču spektra intervālam no 153 MHz līdz 1233 MHz, jo šis intervāls ietver ieraksta frekvenču spektra centrālo daļu ar maksimumu pie 361 MHz un līdz ar to, domājams, lielāko daļu signālu, kas saistāmi ar grunts elektromagnētisko īpašību nevienmērībām un atsevišķu slāņu robežām.

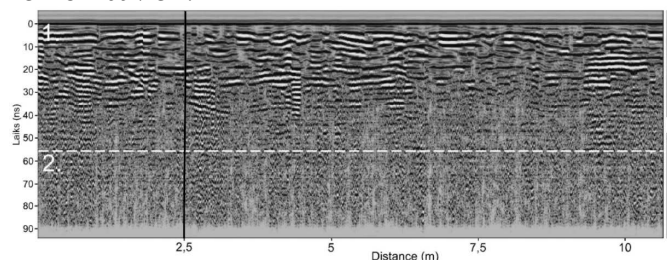
Pēc frekvenču spektra atsevišķu intervālu analīzes kā optimāls tika izvēlēts frekvenču spektra intervāls no 188 MHz līdz 669 MHz. Pēc optimālā frekvenču spektra intervāla izvēles tika konstatēts, ka analīzes gaitā konstatēto subhorizontālo signālu centrālā frekvence atbilst izvēlētajam optimālā intervāla vidusdaļai un no šiem neinformatīvajiem signāliem var atbrīvoties tikai ar speciālām datorprogrammas opcijām.

Pēc frekvenču spektra optimālā intervāla izdalīšanas un papildus apstrādes, tika pieņemts, ka ierakstā galvenokārt ir saglabājušies tikai signāli, kas saistāmi ar grunts elektromagnētisko īpašību nevienmērībām un atsevišķu slāņu robežām.

Radarogrammas analīze

Radarogrammā ir iespējams izdalīt divas zonas. *Pirmā zona* ir izdalāma visā profila garumā līdz 56 ns laika aizturei. Pirmajā zonā sastopamo signālu frekvenču spektram raksturīga normālsadalījuma forma ar maksimālo vērtību pie 400 MHz frekvences. Šajā zonā vērojami daudzi signāli ar salīdzinoši lielām amplitūdām (9. att.). Kopumā signālu veidotā struktūra liecina par to, ka radarogrammā atbilstošā profila novietojuma vietā grunts slāņiem ir raksturīgs heterogēns elektromagnētisko īpašību sadalījums.

Otrā zona izdalāma visā radarogrammas garumā no 56 ns līdz 90 ns laika aizturei. Šajā zonā signāliem ir salīdzinoši augsta frekvence un to kopējā struktūrā nav vērojamas likumsakarības, līdz ar to šie signāli ir uzskatāmi par neinformatīviem.



Apzīmējumi

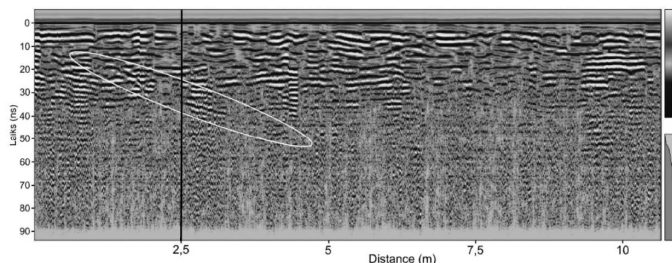
----- - izdalīto zonu robeža 2. - izdalītās zonas numurs | - Skatruma novietojums

9.att. Radarogrammas 5-2-900 signāli, kas saistāmi ar ieraksta frekvenču spektra optimālo intervālu

Turpmākā radarogrammas analīzē dziļuma intervālā no 1,08 m līdz 2,3 m atzīmei vidēji pēc 42 ns laika aiztures nepārprotami izdalāms ieslīps signāls ar salīdzinoši lielu amplitūdu (10. att.). Jau datu pirmapstrādes gaitā tika uzskatīts, ka šis signāls ir saistīts ar vizuāli identificēto slāņu robežām (sk. 3. att.). Šāds pieņēmums tika izdarīts, jo signāla ģeometriskās īpašības sakrīt ar grunts slāņu ģeometriskajām īpašībām vietā, kur tika izvietots radiolokācijas profils 5 un, ņemot vērā tieši šī signāla novietojumu radarogrammā, tika

izvēlēta novietojuma vieta skatrakumam griezumā ģeoloģiskās uzbūves precizēšanai.

Izdalītajam signālam atbilstošā frekvenču spektra maksimums atbilst 372 MHz, signāla amplitūda ievērojami variē visā intervālā, kur tas ir viennozīmīgi identificējams. Diemžēl signāls vietām atsevišķos lokācijas zondējumos nav fiksēts (piemēram, pie 2,34 m atzīmes). Signāla izsekošana ārpus intervāla, kur to ir iespējams identificēt viennozīmīgi, ir visai apgrūtināta. Tā intervālā no 0 m atzīmes līdz 1,08 m atzīmei signālu ir iespējams izšķirt, taču identifikācija ir apgrūtināta un galvenokārt balstīta uz šajā zonā sastopamo signālu struktūras ģeometriskajām īpašībām. Tālāk - intervālā no 2,3 m līdz 6,56 m atzīmēs vidēji pēc 48 ns laika aiztures informatīvo signālu ir iespējams identificēt, taču identifikācija ir neviennozīmīga un balstās uz atsevišķu signāla fragmentu interpolāciju. Kopumā, analizējot atsevišķus zondējumus, tika konstatēts, ka šo informatīvo signālu vairumā zondējumu droši nav iespējams izšķirt. Tajā pašā laikā signāli ir diagnosticējami un izsekojami.



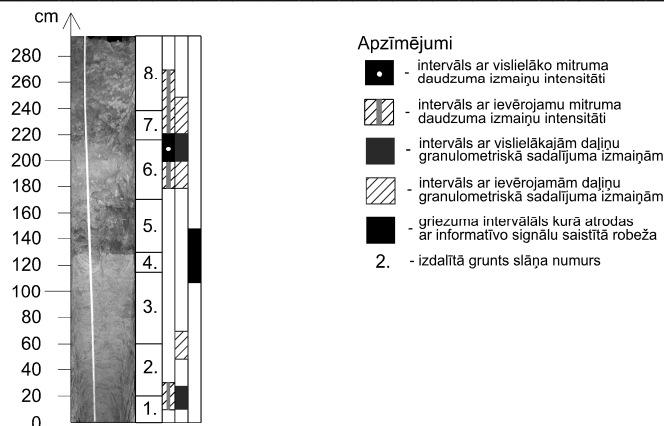
Apzīmējumi



10.att. Ar vizuāli identificēto slāņu robežām saistītais informatīvais signāls radarogrammā 3-2-900.

REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Iegūti ļoti augstvērtīgi pētījumu rezultāti, iegūtās radarogrammas tika sekmīgi interpretētas un informatīvā signāla piesaiste kontrastainām grunts mitruma un granulometriskā sastāva izmaiņām tika noskaidrota. Tomēr šādas atkarības visdrīzāk ir empīriskas un vēl joprojām attālas no patiesajām likumsakarībām. Minēto uzskatāmi apliecina 3. skatrakuma griezumā analītisko pētījumu un to analīzes dati. Tā šeit (11. att.) 80 cm dziļumā tika identificēta ļoti kontrastaina robeža, analizējot gan mitruma daudzuma, gan grunts daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņas, bet radarogrammā informatīvais signāls ir reģistrēts no 1,7 m dziļuma. Tādējādi šeit 3. skatrakuma griezumā 1,7 m dziļumā ir konstatēta ļoti kontrastaina elektromagnētisko īpašību robeža, kas nav saistīta ar mitruma daudzuma izmaiņām un grunts daļiņu granulometriskā sadalījuma izmaiņām. Visdrīzāk šī robeža varētu būt saistīta ar grunts slāņu minerālā sastāva izmaiņām.



11.att. 3. skatrakuma griezumā identificētie grunts īpašību izmaiņu intervāli.

Pētījuma gaitā augstas kvalitātes informatīvi signāli tika iegūti, tikai izmantojot 900 MHz antenu sistēmu. 750 MHz antenu sistēmas konstrukcija neļauj tai atrasties ciešā kontaktā ar pētāmo vidi, ja tiek izmantota radiolokācijas profilēšanas metode. Tādēļ nereti visai ievērojama daļa zondējošā impulsa enerģijas tika atstarota jau no grunts virskārtas. Grūtāk ir izskaidrot to, ka informatīvus signālus neizdevās iegūt, izmantojot 500 MHz antenu sistēmu. Iespējams, ka patiešām tā ir pārāk zema frekvence pētījumiem mālainos nogulumos.

Ņemot vērā literatūrā atrodamās signāla disipācijas lieluma atkarības no izmantotās antenu sistēmas centrālās frekvences [5], tika prognozēts, ka daudz lielāki signāla intensitātes zudumi būs, izmantojot augstākas frekvences antenu sistēmu, un līdz ar to lielāka iespējamība iegūt informatīvu signālu būs, izmantojot tieši 500 MHz antenu sistēmu nevis 900 MHz antenu sistēmu. Tomēr citi pētnieki [2] norāda, ka dažos gadījumos tas, vai tiks iegūts signāls no kādas konkrētas robežas, ir atkarīgs no izmantotās antenu sistēmas centrālās frekvences, bieži vien labāki rezultāti tiek sasniegti, izmantojot antenu sistēmu ar augstāku centrālo frekvenci.

Ņemot vērā iepriekšminēto, jāsecina, ka mālainās gruntīs ieteicams izmantot tieši 900 MHz antenu sistēmu. Tāpat turpmāk būtu jāpēta no mālainu grunts slāņu robežām iegūto signālu intensitātes atkarību no izmantotās antenu sistēmas centrālās frekvences.

SECINĀJUMI

Veiktais pētījums pirmo reizi ir ļāvis iegūt drošus un interpretējamus radiolokācijas signālu atstarojumus mālainās un aleirītiskās gruntīs. Šādi signāli ir diagnosticējami un izsekojami Liepas karjera gadījumā vismaz līdz 2 m dziļumam no zemes virsas.

Analizējot pētījumā iegūtos rezultātus, konstatējams, ka mālainu iežu elektromagnētiskās īpašības galvenokārt ir atkarīgas no mitruma daudzuma un grunts daļiņu granulometriskā sadalījuma, bet turpmākos pētījumos uzmanība būtu jāpievērš arī grunts slāņu minerālajam, iespējams, arī ķīmiskajam sastāvam, kas vismaz atsevišķos gadījumos varētu būt galvenais faktors, kas nosaka grunts slāņa elektromagnētiskās īpašības.

Veicot radiolokācijas profilēšanu virs subhorizontāli iegulošiem mālainiem grunts slāņiem, iegūt viennozīmīgi interpretējamus rezultātus ir salīdzinoši grūti. Arī pēc veiktā pētījuma nav iespējams viennozīmīgi noteikt metodes un paņēmienus šādu robežu identificēšanai un nošķiršanai mālainās gruntīs un iežos.

PATEICĪBAS

Pētījums izstrādāts ar LZP granta „Latvijas minerālie resursi un inovatīvi funkcionāli materiāli uz minerālo un sintētisko izejvielu bāzes” (09.1553.3), VPP „Vietējo resursu (zemes dzīļu, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)” apakšprojekta Nr.1 „Jaunu tehnoloģiju izstrādāšana inovatīvu produktu radīšanai no Latvijas zemes dzīļu resursiem (ZEMES DZĪLES)” un ESF projekta „Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē” (Nr. 2009/0162/1DP/1.1.2.1.1/09/IPIA/VIAA/004) atbalstu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] **Burger, H.R., Sheehan, A.F., Jones, C.H.** *Introduction to Applied Geophysics*. New York, N.Y., W.W. Norton & Company Inc., 2006. 524 – 539 p.
- [2] **Изюмов, С.В., Дручинин, С.В., Вознесенский, А.С.** *Теория и методы георадиолокации*. Москва, Издательство Горная книга, 2008. 192 с.
- [3] **Conyers, L.B.** *Ground-Penetrating Radar for Archeology*. Walnut Creek, California, A division of Rowman & Littlefield Publishers, 2004. 45 – 55 p.

- [4] **Владов, М.Л., Старовойтов, А.В.** *Введение в георадиолокацию*. Москва, Издательство Московского университета, 2004. 153 с.
- [5] **Финкельштейн, М.И., Карпунин, В.И., Кутев, В.А., Метелкин, В.Н.** *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь, 1994. 215 с.
- [6] **Reynolds, M.J.** *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex, John Wiley & Sons, 1997. 682 – 745 p.

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.karuss@inbox.lv

Valdis Seglins. Dr. geol., University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences, Department of Geology, author of up to 300 scientific publications in area of Earth Sciences.

Address: Raiņa bulv. 19, LV1050, Riga, Latvia

Phone +37167331, Fax: +371 67332704

e-mail: valdis.seglins@lu.lv

Daiga Pipira, MSc.geol. 2012, Dr.geol. stud.

Current position: Scientific laboratory assistant of the Department of Applied geology at the Faculty of Geography and Earth Sciences at the University of Latvia. Her major fields of study are sedimentology and clay mineralogy. She is the coauthor of the scientific publication in the field of clay minerals: Virčava, I., Pipira, D., Segliņš, V., Stunda, A. Rentgenstaru pulverdifrakcijas metodes illīta, illīta-smektitā noteikšanai un to pielietojums Latvijas māliem. *RTU zinātnisko rakstu sērija Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*, 2011, Nr.24., 14.-19.lpp.

Address: Alberta 10, Riga, LV 1010, Latvia

e-mail: daiga_pipira@inbox.lv

Jānis Karušs, Valdis Segliņš, Daiga Pipira. Analysis of Ground Penetrating Radar Signals Acquired in Clay Deposits

In this research radiolocation method application possibilities on clay rich sediment layers research were analyzed and evaluated. Main attention was paid on signals that are associated with boundaries of clay rich sediment layers with different properties. Research was realized using *Radar systems* ground penetrating radar *Zond-12e* with three different shielded antenna systems – 500 MHz, 750 MHz and 900 MHz. In radiolocation profiling acquired signals, which are related with sediment layers electromagnetic properties, were related with sediment layers physical properties. In field work acquired soil sample properties were determined with laboratorial tests (moisture content and granulometric distribution analysis).

High quality data where obtained – interpretation of all acquired radarograms were done and connection of informative signals to contrasting soil moisture and granulometric composition boundaries were established. In progress of research high quality informative signals were acquired with 900 MHz antenna. Reasons why signal, which were acquired with lower frequency antennas, quality was lower should be studied in future. It is difficult to acquire unequivocal interpretable data from radiolocation profiles that are made on clay rich sediment layers with horizontal bedding, without reference of used antenna system central frequency. This is one of the limiting factors to method application in future.

Research allows us to conclude, that clay rich sediment layers electromagnetic properties are mainly dependent of moisture content and particle granulometric distribution. Nonetheless in future sediment layers mineral and chemical composition should be studied, because at least in some cases it could be the main factor that determines sediment layers electromagnetic properties.

Янис Карушс, Валдис Сеглиньш, Дайга Пипира. Анализ георадиолокационных сигналов, полученных в глинистых породах

В исследовании проведен анализ и дана оценка возможностям применения метода радиолокации в изучении глинистых пород, основное внимание уделяя сигналам, которые связаны с геологическими границами различных глинистых пород. В исследовании применялся георадар *Zond-12e* производства *Radar systems*, укомплектованный тремя различными экранированными антеннами - 500 MHz, 750 MHz и 900 MHz. Сигналы, полученные в ходе радиолокационного профилирования, связанные с границами электромагнетических свойств слоев, были сопоставлены так же с физическими свойствами пород. Свойства пород (естественная влажность и гранулометрический состав) изучены посредством лабораторного анализа образцов, отобранных в ходе полевых работ.

В результате получены ценные результаты – проинтерпретированы все радарограммы и выполнена привязка информативного сигнала к контрастным изменениям влажности грунта и его гранулометрического состава. В ходе исследования информативные сигналы высокого качества были получены, используя антенну с частотой в 900 MHz, в будущем стоит исследовать причины низкокачественных сигналов, полученных с использованием более низкочастотных антенн в глинистых породах. Проводя радиолокационное профилирование над субгоризонтально залегающими глинистыми слоями грунта, получить однозначно интерпретируемый сигнал сравнительно сложно, независимо от частоты используемых антенн и это считается ограничением для широкого применения данной методики.

Исследование дает сделать выводы, что электромагнетические свойства глинистых пород в основном зависят от степени влажности и гранулометрического состава. Все же дополнительно стоит исследовать минеральный и химический состав слоев грунта, что в отдельных случаях может быть главным фактором, который определяет электромагнетические свойства глинистых пород.