

Cenas tīrelī iegūto radiolokācijas signālu analīze

Jānis Karušs¹, Valdis Segliņš², ¹⁻²Latvijas Universitāte

Kopsavilkums. Pētījums ir veltīts purvu nogulumos iegūto radiolokācijas signālu analīzei un interpretācijai. Tiek sniegts pētījumu teritorijas ģeoloģiskās uzbūves apraksts, izmantotās pētījumu metodikas apraksts darbā ar 300 MHz antenu sistēmu, analizēta kūdras sadalīšanās pakāpe, pelnainība un dabiskais mitrums. Tāpat ir sniegta detaļa iegūto radiolokācijas signālu analīze. Secināts, ka elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu kūdrā nenosaka tikai kūdras mitruma daudzuma izmaiņas. Pētījumos ar radiolokācijas metodi elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums kūdras slāņos jānosaka ar augstu precizitāti, izmantojot kopējā viduspunkta metodi.

Atslēgas vārdi: ģeoradars, ģeofizika, Cenas tīrelis, kūdras elektromagnētiskās īpašības.

IEVADS

Radiolokācijas metode tiek pielietota purvu nogulumu pētījumos salīdzinoši sen, un jau pagājušā gadsimta septiņdesmito gadu beigās tika pierādīts, ka radiolokācijas metodi ir iespējams pielietot kūdras krājumu novērtēšanā purvos [1]. Signāli tika konstatēti, korelēti ar ģeoloģiskā griezumā raksturīgām virsmām un sekmīgi pielietoti kūdras novērtējumam vienkāršiem izmantošanas veidiem. Turpmākajos gados padziļināti pētījumi nesevoja un iemesli, kāpēc radiolokācijas signāla atstarojums ir izveidojies, ir skaidroti salīdzinoši vienkāršoti.

Bieži vien ir ticis pausts viedoklis, ka iegūtie radiolokācijas signāli ir saistīti ar nogulumu mitruma daudzuma izmaiņām griezumā [2,3]. Tāpat līdzšinējos pētījumos bieži vien tiek atzīmēts, ka iegūtie radiolokācijas signāli var būt saistīti ar kūdras humifikācijas pakāpes izmaiņām griezumā [4,5]. Minētais norāda, ka līdz šim nav rasts pietiekami pamatots skaidrojums radiolokācijas signāla atstarojumiem purvu nogulumos.

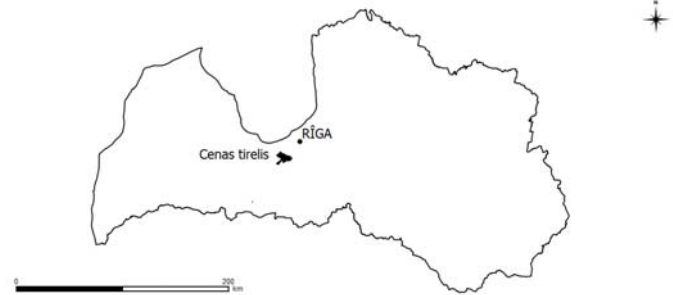
Neskatoties uz to, ka radiolokācijas metode tiek attīstīta jau vairākus gadu desmitus, joprojām nav izstrādāta lauka darbu standartizēta metodika, kā arī datu apstrādes procedūras un metodika – tās vienmēr ir tikušas pielāgotas konkrētā pētījuma vajadzībām [2,5].

Nemot vērā iepriekšēji minēto, pētījuma mērķis ir noskaidrot kūdras fizikālās īpašības, kas galvenokārt nosaka kūdras elektromagnētiskās īpašības, kā arī identificēt atstaroto signālu īpašības un sniegt to ģeoloģisko interpretāciju.

PĒTĪJUMU TERITORIJA

Pētījums tika realizēts Cenas tīrelī aptuveni 18 km uz DR no Rīgas (1. att.). Purva teritorija atrodas Piejūras dabas apvidū, kuram raksturīgs salīdzinoši līdzens reljefs, kas arī ir veicinājis augstā tipa purvu veidošanos. Purva platība ir 8983 ha, un tā lielāko daļu – 6200 ha aizņem augstā tipa purvs. Cenas tīrelis ir veidojies Baltijas ledus ezera nogulumu

virsmas pazeminājumā, pārsedzot smilšainus un mālsmilts nogulumus.



1. att. Pētījumu teritorijas novietojums.

Izmantojot laboratorijas analīžu rezultātus, tika noteikts, ka pētījumu teritorijā purvu nogulumu virsējo kārtu, aptuveni 2,5 m biežumā, veido augstā tipa kūdra. Griezumā izdalāmi fuskuma sfagnu, spilvju sfagnu, magelānsfagnu, šeihcēriju sfagnu un šaurlapu sfagnu kūdras slāņi. Dziļāk iegūļ aptuveni 0,1 m biezs pārejas tipa kūdras slānis, kuru veido vairāki zāļu sfagnu, grīšļu un grīšļu hipnu kūdras slāņi. Purva nogulumu dziļākos slāņus veido apmēram 1,8 m biezs zemā tipa kūdras slānis, kuru veido grīšļu, grīšļu hipnu, zāļu un koku grīšļu kūdra. Pētījumu teritorijā purva pamatni veido Baltijas ledus ezera smilšaini un aleirītiski nogulumu, šeit to biežums pārsniedz 5 metrus un šajā pētījumā tie netika īpaši analizēti.

MATERIĀLI UN METODES

Pētījumā tika izmantots SIA Radar Systems Latvijā ražotais divkanālu ģeoradars *Zond-12e*. Iepriekšēji veiktie pētījumi norāda [6,7,8], ka labākie rezultāti var tikt iegūti, izmantojot antenu sistēmas ar rezonanses frekvenci, kas tuva 250 MHz, tādēļ mūsu pētījumā tika izmantota sērijveidā ražotā 300 MHz ekrānēta antenu sistēma (2. att.).



2. att. Radiolokācijas profilēšana Cenas tīrelī.

Tika izvēlēta profilēšanas metode [9], kas ļauj veikt nepārtrauktu signālu ierakstu un izvēlēto profilu tieši sasaisīt ar urbumu un zondējumu ģeoloģiskiem datiem. Ieraksts tika veikts, nepārtraukti fiksējot katru impulsu un izmantojot analogu *High-pass* frekvenču filtru, ar kura palīdzību tika automātiski dzēsti neinformatīvi signāli. Profilēšanas laikā ģeoradars ierakstīja 81 zondējumu sekundē. Veiktā radiolokācijas profila garums tika noteikts, izmantojot mērlenti. Ieraksts tika veikts līdz 500 ns laika aizturai, kas atbilst 9,38 m dziļumam, pieņemot, ka grunts pētījumu teritorijā ir kūdra, kurai atbilstošais dielektriskās caurlaidības koeficients ir 64.

Sākotnēji Cenas tūrelī tika ierakstīti vairāki radiolokācijas profili, pēc kuru analīzes tika izvēlēta vieta detalizētiem pētījumiem. Detalizēti pētījumi tika veikti vietā, kurai atbilstošajā radarogrammā bija iespējams identificēt signālu, kas saistāms ar purva gultni un vismaz divus subhorizontālus signālus, kas saistāmi ar purva nogulumu slāņu, kuriem ir atšķirīgas elektromagnētiskās īpašības, robežām.

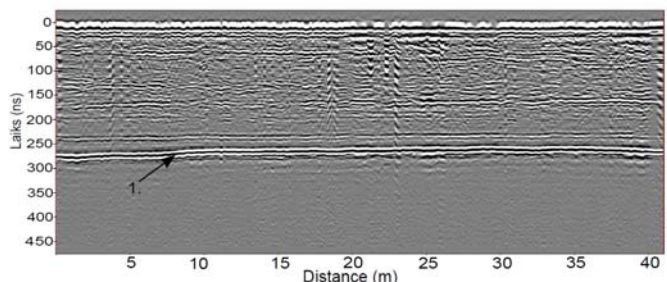
Radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūtās radarogrammas tika apstrādātas un analizētas datorprogrammā - *Prism 2.5*.

Apstrādājot iegūtās radarogrammas, tika izmantota funkcija „gain”, kuru izmantojot iegūtie signāli tika pastiprināti proporcionāli laika aizturai, pēc kuras tie tika saņemti. Izmantojot Ormsbija filtru, tika dzēsti neinformatīvi signāli ar salīdzinoši zemu frekvenci, kas visticamāk ir saistīti ar purva virsmas nelīdzenumiem. Tā kā raidītāja un uztvērēja antenas neatrodas vienā punktā, ir nepieciešams veikt laika korekciju, un tā tika realizēta ar „*moveout correction*” funkciju.

Pētītajā purvā kūdras biežums nav ļoti liels, kas netieši norāda uz to, ka arī atsevišķi kūdras slāņi nebūs bieži un līdz ar to zondējošajam signālam būs nepieciešams salīdzinoši mazs laika intervāls, lai šķērsotu atsevišķus nogulumu slāņus. Līdz ar to, ja atsevišķu nogulumu slāņu biežumi tiktu aprēķināti, izmantojot vidējo elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu griezumā, aprēķinātās biežumu vērtības salīdzinoši maz atšķirsies no patiesajām slāņu biežuma vērtībām.

Balstoties uz iepriekšminēto, lai noteiktu dziļumu, no kura saņemti identificētie signāli, tika izmantots vidējais elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums pētītajā griezumā. Ņemot vērā to, ka iegūtajās radarogrammās ir iespējams viennozīmīgi identificēt signālu, kas saistīts ar purva gultni (3. att.), vidējais elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums griezumā tika aprēķināts, izmantojot laika aizturi, pēc kuras tika saņemts minētais signāls un pētījumu teritorijā ierīkotajos urbumos noteiktais purva biežums.

Iegūto radarogrammu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta subhorizontāliem signāliem, kas izsekojami visā profila garumā, jo tieši šādi signāli ir saistāmi ar izteiktām nogulumu slāņu robežām. Minētajiem signāliem tika noteikta to fāze salīdzinājumā ar signālu, kas ceļojis tieši no raidītāja uz uztvērēju, kā arī signālu amplitūdas izmaiņas un identificēšanas iespējas visā profila garumā.



Apzīmējumi

1. - identificētais signāls

3. att. Radarogrammā cena_2-1_300 identificētais signāls, kas saistāms ar purva gultni.

Lai saistītu radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūtos signālus ar kūdras īpašību maiņu griezumā, pētījumu teritorijā uz profila līnijas tika ierīkoti divi urbumi. Urbumi tika ierīkoti vietās, kur iegūtajā radarogrammā bija iespējams viennozīmīgi identificēt visus radarogrammā sastopamos subhorizontālos signālus. No urbumiem iegūtā serde tika detalizēti aprakstīta un pēc tam laboratorijas apstākļos no tās tika noņemti paraugi laboratorijas analīzēm, kuru veidi tika izvēlēti, ņemot vērā iepriekšēji veikto pētījumu rezultātus [3,4]. Tas ir – tika apzināti parametri, ar kuru izmaiņām ģeoloģiskajā griezumā līdzīga rakstura pētījumos ir tikuši saistīti radiolokācijas signālu atstarojumi. Par tādiem tika noteikti kūdras mitruma daudzums, pelnainība un sadalīšanās pakāpe, bet papildus tika noteikts arī kūdras botāniskais sastāvs.

Kūdras paraugu mitruma daudzums tika noteikts, izmantojot svara zudumu pēc karsēšanas 105°C temperatūrā, savukārt kūdras paraugu pelnainība tika noteikta, izmantojot svara zudumu pēc karsēšanas 800°C temperatūrā [10]. Mitruma daudzuma un pelnainības analīzes tika veiktas Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Iežu pētījumu un Vides ķīmijas laboratorijā.

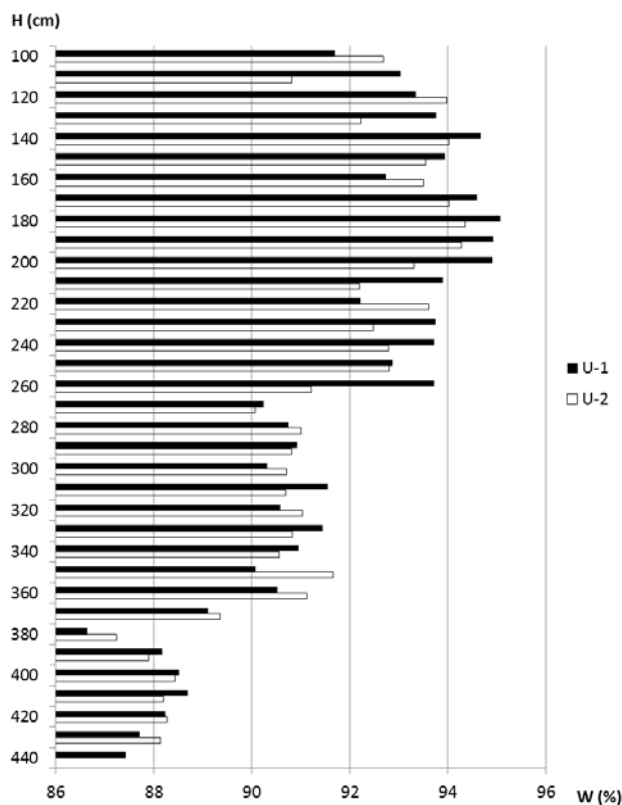
Kūdras sadalīšanās pakāpe SIA „Vides Konsultāciju Birojs” laboratorijā tika noteikta, izmantojot kūdras botāniskā sastāva analīžu rezultātus [10].

REZULTĀTI

Laboratorisko pētījumu rezultāti

Lai saistītu radarogrammā cena_2-1_300 identificētos subhorizontālos signālus ar kūdras īpašību izmaiņām griezumā, pētījumu teritorijā tika ierīkoti divi urbumi.

Urbumā U-1, purva gultne tika sasniegta 452 cm dziļumā un kūdras paraugi tika iegūti, sākot no 50 cm dziļuma, savukārt urbumā U-2 purva gultne tika sasniegta 444 cm dziļumā un kūdras paraugi tika iegūti, sākot no 60 cm dziļuma. Urbšanas laikā līdz viena metra dziļumam, ceļot ārā urbi, noņemtais kūdras monolīts strauji zaudēja ūdeni, tādēļ kūdras paraugos noteiktais mitruma daudzums uzskatāms par korektu, sākot no viena metra dziļuma (4. att.).



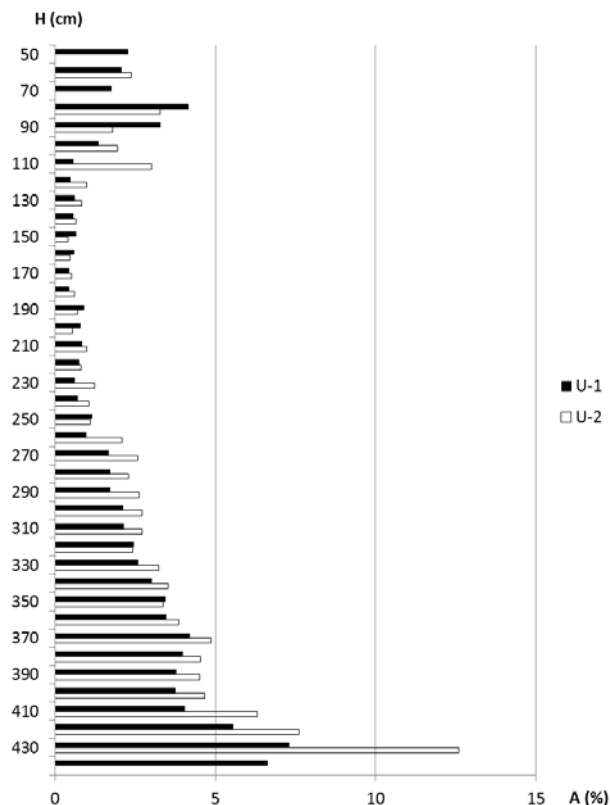
4. att. Mitruma daudzuma izmaiņas U-1 un U-2 urbumu griezumā.

Urbumā U-1 kūdras mitruma daudzums variē intervālā no 86,65 % līdz 95,73 % (sk. 4. att.), un pēc šī rādītāja izmaiņām griezumā ir iespējams izdalīt trīs intervālus ar salīdzinoši nemainīgu mitruma daudzumu. Tā intervālā no 100 cm līdz 265 cm dziļumam, var izdalīt kūdras slāni ar mitruma daudzumu aptuveni 93,7 %. Intervālā no 270 cm līdz 375 cm dziļumam, var izdalīt otro intervālu, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni 90,59 %. Savukārt trešo intervālu iespējams izdalīt no 390 cm līdz 445 cm dziļumam, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni 88,13 %, bet 380 cm dziļumā apzināts kūdras slānis ar salīdzinoši zemu mitruma daudzumu.

Urbumā U-2 kūdras mitruma daudzums variē intervālā no 87,24 % līdz 94,35 % (sk. 4. att.), un arī šajā urbumā atsegtajā purva griezumā ir iespējams izdalīt trīs intervālus ar salīdzinoši nemainīgu kūdras mitruma daudzumu. Tā intervālā no 100 cm līdz 255 cm dziļumam, var izdalīt pirmo intervālu, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni 93,16 %. Intervālā no 260 cm līdz 375 cm dziļumam, var izdalīt otro intervālu, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni 90,76 %. Savukārt trešo intervālu iespējams izdalīt no 390 cm līdz 435 cm dziļumam, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni 88,19 %, un arī šajā griezumā 380 cm dziļumā apzināts kūdras slānis ar salīdzinoši zemu mitruma daudzumu.

Iepriekšēji sniegtais apraksts ļauj izsekot 4 kūdras slāņus ar atšķirīgu mitruma daudzumu un šo slāņu robežas uzskatāmas par iespējamām radiolokācijas signāla atstarojuma virsmām.

Kūdras pelnainība tika noteikta, paraugiem aptverot visu purva griezumā, un ir uzskatāma par korekti noteiktu visā urbumu intervālā (5. att.).



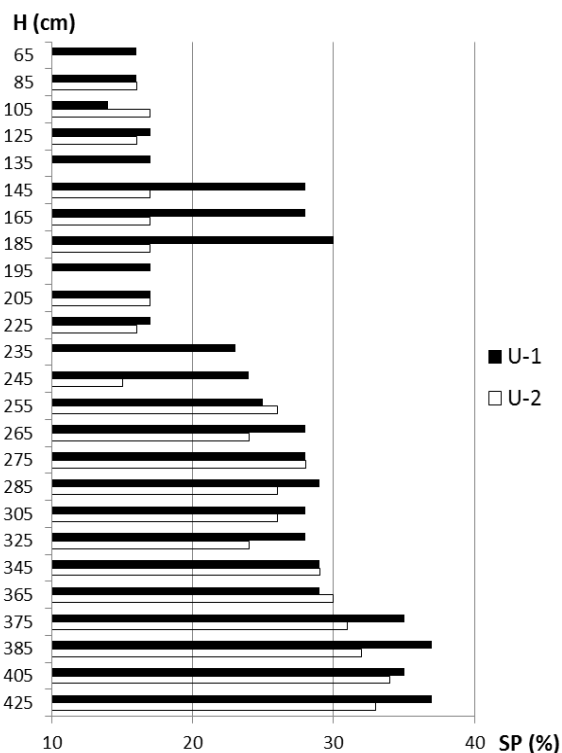
5. att. Kūdras pelnainības izmaiņas U-1 un U-2 urbumu griezumā.

Urbumā U-1 kūdras pelnainība variē intervālā no 0,43 % līdz 7,3 % un palielinās līdz ar dziļumu, bet iegūtie analītiskie dati neļauj urbuma griezumā sadalīt intervālos ar salīdzinoši nemainīgu pelnainību. Tomēr urbuma U-1 griezumā var izdalīt atsevišķus intervālus ar salīdzinoši nemainīgu kūdras pelnainību. Tā intervālā no 80 cm līdz 95 cm dziļumam var izdalīt kūdras slāni ar paaugstinātu pelnu saturu (3,72 %), kā arī intervālā no 370 cm līdz 415 cm dziļumam var izdalīt kūdras slāni ar salīdzinoši nemainīgu pelnu saturu (3,96 %) (sk. 5. att.).

Urbumā U-2 kūdras pelnainība variē intervālā no 0,41 % līdz 12,61 % (sk. 5. att.). Kūdras pelnainības izmaiņas urbuma U-2 griezumā ir līdzīgas kā urbuma U-1 griezumā – kūdras pelnainība palielinās, palielinoties dziļumam. Urbuma U-2 griezumā var izdalīt atsevišķus kūdras slāņus ar paaugstinātu pelnainību – 80 cm un 115 cm dziļumā. Tāpat griezuma intervālā no 370 cm līdz 405 cm dziļumam iespējams identificēt kūdras slāni ar salīdzinoši nemainīgu pelnu saturu.

Datu analīze norāda, ka urbumu griezumā nav iespējams izdalīt kūdras slāņus ar krasi atšķirīgu pelnu saturu, kas būtu izsekojami visā pētījuma teritorijā. Vienīgais izņēmums ir kūdras slānis ar paaugstinātu pelnu saturu 80 cm dziļumā, kura robežas ir uzskatāmas par iespējamām radiolokācijas signāla atstarojuma virsmām (sk. 5. att.).

Kūdras sadalīšanās pakāpe kopumā tika noteikta 46 paraugiem – no urbuma U-1 analīzes tika veiktas 25 paraugiem, bet no urbuma U-2 21 paraugam (6. att.).



6. att. Kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas U-1 un U-2 urbumu griezumā.

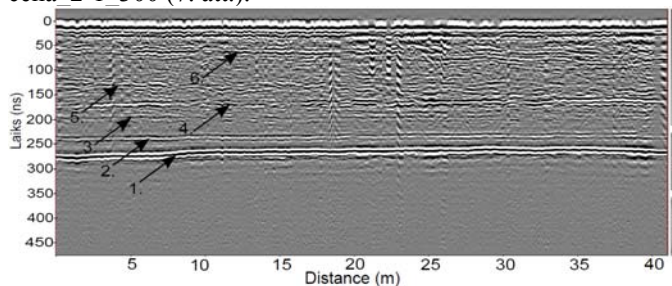
Urbumā U-1 kūdras sadalīšanās pakāpe variē intervālā no 14 % līdz 37 % (sk. 6. att.). Urbuma U-1 griezumā pēc sadalīšanās pakāpes ir iespējams izdalīt vairākus slāņus, kuros tā ir salīdzinoši nemainīga. Tā intervālā no 65 cm līdz 140 cm dziļumam ir izdalāms nogulumu slānis ar kūdras sadalīšanās pakāpi aptuveni 16 %. Tālāk dziļumā no 145 cm līdz 190 cm ir izdalāms nogulumu slānis ar salīdzinoši augstu kūdras sadalīšanās pakāpi (28,5 %). Dziļumā no 195 cm līdz 230 cm ir izdalāms nogulumu slānis ar kūdras sadalīšanās pakāpi 17 %, bet intervālā no 235 cm līdz 370 cm dziļumam ir izdalāms nogulumu slānis ar salīdzinoši nemainīgu kūdras sadalīšanās pakāpi (27 %). Raksturīgi, ka minētajā intervālā, palielinoties dziļumam, kūdras sadalīšanās pakāpe palielinās. Dziļumā no 375 cm līdz 430 cm ir izdalāms nogulumu slānis ar kūdras sadalīšanās pakāpi 36 %, kas ir maksimālā apzinātā šī lieluma vērtība urbuma U-1 griezumā.

Urbumā U-2 kūdras sadalīšanās pakāpe variē intervālā no 15 % līdz 34 % (sk. 6. att.). Urbuma U-2 griezumā pēc sadalīšanās pakāpes ir iespējams izdalīt divus slāņus. Intervālā no 85 cm līdz 250 cm dziļumam ir izdalāms nogulumu slānis ar kūdras sadalīšanās pakāpi aptuveni 16,4 %, kas variē salīdzinoši maz visā izdalītajā intervālā. Intervālā no 255 cm līdz 430 cm dziļumam ir izdalāms nogulumu slānis ar salīdzinoši nemainīgu kūdras sadalīšanās pakāpi, kas ir vienāda ar aptuveni 28,5 %. Izdalītajā intervālā, palielinoties dziļumam, kūdras sadalīšanās pakāpe palielinās.

Iepriekšēji sniegtais raksturojums norāda, urbumu U-1 un U-2 griezumos, pēc kūdras sadalīšanās pakāpes rādītāja, ir iespējams identificēt kūdras slāņu robežas ar krāsām sadalīšanās pakāpes izmaiņām, kas ir izsekojamas visā pētījuma teritorijā. Tā urbumā U-1 235 cm dziļumā vērojama krasa kūdras sadalīšanās pakāpes palielināšanās, kā arī urbumā U-2 255 cm dziļumā identificējama krasa kūdras sadalīšanās pakāpes palielināšanās (sk. 6. att.). Identificēta robeža uzskatāma par iespējamu radiolokācijas signāla atstarojuma virsmu. Urbumā U-1 dziļumā no 145 cm līdz 190 cm identificēta nogulumu slāņa ar salīdzinoši augstu kūdras sadalīšanās pakāpi robežas vismaz lokāli var tikt uzskatītas par iespējamām radiolokācijas signāla atstarojuma virsmām. Līdzīgi par lokālu iespējamu atstarojuma virsmu var tikt uzskatīta U-1 urbumā konstatētā robeža starp kūdras slāņiem ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi 375 cm dziļumā.

Iegūtās radarogrammas analīze

Visas pētījuma gaitā iegūtās radarogrammas bija kvalitatīvas un izmantojamas tālākai datu apstrādei un interpretācijai. Detalizēta analīze tika veikta radarogrammai cena 2-1_300 (7. att.).



Apzīmējumi

1. - identificētais signāls

7. att. Radarogrammā cena_2-1_300 identificētie informatīvie signāli.

Iegūtajā radarogrammā informatīvie signāli ir identificējami līdz pat 310 ns laika aizurei, un šajā intervālā ir iespējams identificēt sešus subhorizontālus signālus, kas saistīti ar robežām, kas nošķir nogulumu slāņus ar atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām (sk. 7. att.).

1. signāls ir izsekojams visā radarogrammā, un tam ir salīdzinoši liela amplitūda, kas norāda uz to, ka minētais signāls ir saistīts ar izteiktām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām (sk. 7. att.). Raksturīgi, ka aprakstītais signāls visā profila garumā ir vienā fāzē ar tiešo signālu. Tas norādu uz to, ka nogulumu slānim, kas paguļ robežai, kas saistīta ar šo signālu, ir mazāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients nekā uzguļošajam nogulumu slānim. Ņemot vērā aprakstītās signāla īpašības, tas tiek saistīts ar purva gultni.

Otrais (2) signāls ir izsekojams visā radarogrammā, tomēr atsevišķās vietās tā amplitūda ir salīdzinoši neliela (sk. 7. att.). Signāla amplitūdas lokālās izmaiņas visdrīzāk ir saistītas ar grūtībām profilēšanas laikā nodrošināt antenu pastāvīgu un ciešu kontaktu ar grunts virskārtu. Ņemot vērā minētā signāla amplitūdas lielumu, var secināt, ka signāls ir saistīts ar robežu, kas nošķir kūdras slāņus ar izteikti atšķirīgām

elektromagnētiskajām īpašībām. Aprakstītais signāls visā profila garumā ir pretējā fāzē ar tiešo signālu, kas norādu uz to, ka nogulumu slānim, kas paguļ robežai, kas saistīta ar šo signālu, ir lielāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients nekā uzguļošajam nogulumu slānim.

Trešā (3) signāla izsekošana visā profila garumā ir apgrūtināta (sk. 7. att.). Atsevišķās radarogrammas vietās signāls nav identificējams (piemēram, pie 11 m un 33 m atzīmes), un tā amplitūda kopumā ir salīdzinoši neliela, kas norāda uz signāla saistību ar nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā. Aprakstītais signāla polaritātes identificēšana ir neviennozīmīga, tomēr kopumā ir konstatējams, ka signāls ir pretējā fāzē ar tiešo signālu, kas norādu uz to, ka nogulumu slānim, kas pieguļ robežai, kas saistīta ar šo signālu, ir lielāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients nekā uzguļošajam nogulumu slānim.

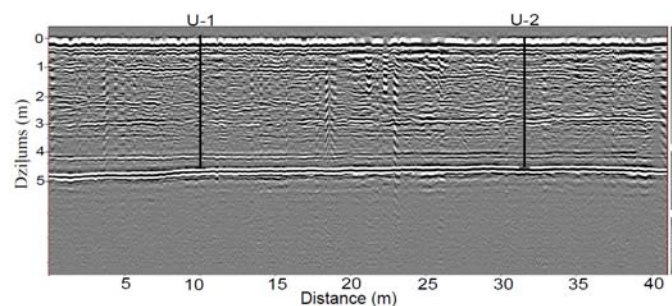
Ceturtais (4) signāls ir izsekojams visā radarogrammā, tam raksturīgās amplitūdas variācijas ir salīdzinoši lielas, un tās nav iespējams skaidrot tikai ar antenas kontakta ar grunts virskārtu izmaiņām (sk. 7. att.). Signāla raksturojums norāda, ka tas ir saistāms ar robežu starp diviem nogulumu slāņiem, kuru elektromagnētisko īpašību atšķirības visā profila garumā nav konstantas. Aprakstītais signāls visā profila garumā ir pretējā fāzē ar tiešo signālu, kas norādu uz to, ka nogulumu slānim, kas paguļ robežai, kas saistīta ar šo signālu, ir lielāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients nekā uzguļošajam nogulumu slānim.

Piektais (5) signāls ir izsekojams līdz 21 m profila garuma atzīmei, kur tas vairs nav izšķirams ar 4. signālu (sk. 7. att.). Ņemot vērā, ka signāls izsekojams tikai daļā no radarogrammas, tas saistāms ar robežu starp nogulumu slāņiem, kas nav izplatīti visā pētījumu teritorijā. Minētajam signālam ir raksturīgas lielas amplitūdas svārstības visā profila garuma intervālā, kur tas izsekojams. Amplitūdas svārstību iemesli skaidrojami līdzīgi kā iepriekš aprakstītajam 4. signālam. Aprakstītais signāls visā intervālā, kurā to iespējams identificēt, ir pretējā fāzē ar tiešo signālu, kas norādu uz to, ka nogulumu slānim, kas paguļ robežai, kas saistīta ar šo signālu, ir lielāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients nekā uzguļošajam nogulumu slānim.

Visā profila garumā, aptuveni pēc 60 ns laika aiztures, ir identificējami vairāki subhorizontāli signāli, kurus var apvienot 6. signālā (sk. 7. att.). Ņemot vērā, ka signālam ir salīdzinoši liela amplitūda, bet tas ir grūti izsekojams visā radarogrammas garumā, signāls domājams ir saistīts ar lokālām elektromagnētisko īpašību izmaiņām griezumā, kas sastopamas aptuveni vienādā dziļumā. Minētajam signālam korekta polaritātes noteikšana nav iespējama.

Izmantojot noteikto purva nogulumu biezumu urbumos U-1 un U-2, kā arī laika aizturi, pēc kuras tika saņemts signāls no purva gultnes urbumiem atbilstošajās vietās, tika aprēķināts, ka vidējais elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums purva nogulumos pētījumu teritorijā ir 34850165 m/s un tam atbilstošais vides dielektriskās caurlaidības koeficients ir vienāds ar 74. Izmantojot iegūto vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtību radiolokācijas profilēšanas

laikā iegūtās laika aiztures vērtības, ar datorprogrammu *Prism* 2.5 tika pārrēķinātas dziļuma vērtībās (8. att.).



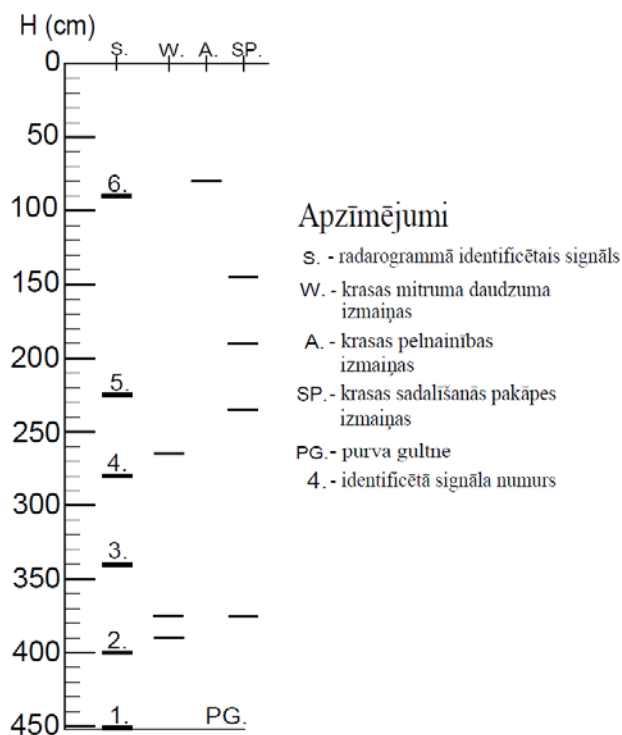
Apzīmējumi

U-2
| – urbuma novietojums

8. att. Radarogramma cena_2-1_300 ar pētījumu teritorijā izvietotajiem urbumiem.

Iegūto radiolokācijas signālu sasaiste ar nogulumu īpašību maiņu griezumā

Balstoties uz radarogrammu cena_2-1_300, tika noteikts dziļums, no kāda saņemti signāli, kas saistāmi ar kūdras slāņu robežām (sk. 8. att., 9. att., 10. att.).



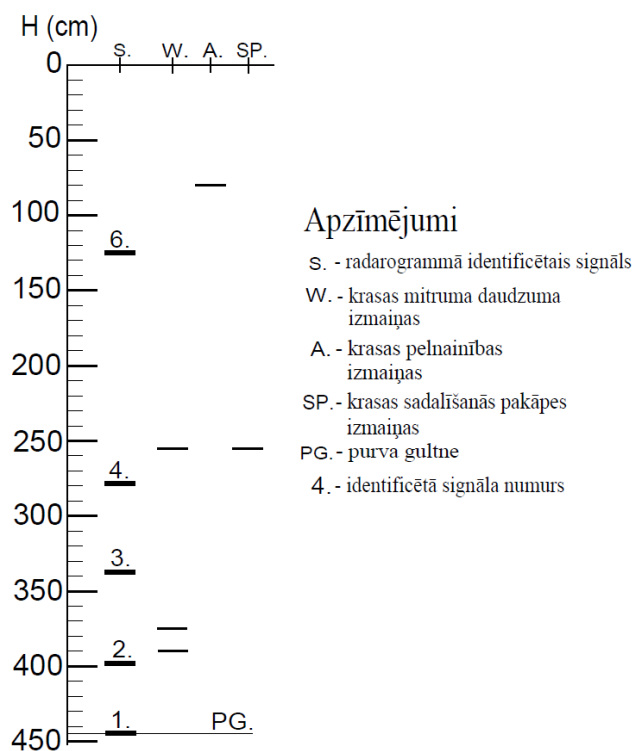
9. att. Iegūto signālu sasaiste ar kūdras īpašību izmaiņām urbuma U-1 griezumā.

8. un 9. attēlā atspoguļotie dati norāda, ka urbumam U-1 atbilstošajā vietā iegūtos radiolokācijas signālus nav iespējams skaidrot tikai ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām griezumā. Signāli, kas varētu būt saistīti ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām griezumā, ir 2. un 4. signāls, bet signāli 3., 5. un 6. nevar tikt skaidroti ar mitruma izmaiņām (sk. 9. att.).

Iegūtos signālus nav iespējams viennozīmīgi sasaistīt tikai ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām griezumā. Analizējot kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas urbuma U-1 griezumā, tika identificētas 4 iespējamās signāla atstarojuma virsmas, taču tikai 5. signāls ir saistāms ar vienu no šīm virsmām 235 cm dziļumā. Pārējās trīs raksturīgās īpašību robežas (145, 190 un 375 cm dziļumā) nav iespējams saistīt ar iegūtajiem radiolokācijas signāliem (sk. 9. att.).

Iespējams, ka radarogrammā identificētais 6. signāls ir saistīts ar urbuma U-1 griezumā konstatēto slāni ar paaugstinātu pelnu saturu 80 cm dziļumā.

Līdzīgi arī urbumam U-2 atbilstošajā vietā iegūtos radiolokācijas signālus nav iespējams skaidrot tikai ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām griezumā (sk. 10. att.).



10. att. Iegūto signālu sasaiste ar nogulumu īpašību izmaiņām urbuma U-2 griezumā.

Kā signāli, kas varētu būt saistīti ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām urbuma U-2 griezumā, jāmin 2. un 4. signāls, bet signāli 3. un 6. nevar tikt skaidroti ar mitruma izmaiņām (sk. 10. att.). Šajā urbuma griezumā tika izdalīti 2 nogulumu slāņi ar atšķirīgu kūdras sadalīšanās pakāpi, kuru robeža identificēta 255 cm dziļumā, un iespējams, ka 4. radiolokācijas signāls ir saistīts ar minēto robežu, bet atlikušie radiolokācijas signāli (1., 2., 3., 6.) nevar tikt skaidroti ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām griezumā. Savukārt 80 cm dziļumā identificēto kūdras slāni ar paaugstināto pelnu saturu nav iespējams droši sasaistīt ne ar vienu no iegūtajiem radiolokācijas signāliem.

DISKUSIJA

Balstoties uz citu pētnieku rekomendācijām [6,7,8], pētījumā tika izmatota 300 MHz antenu sistēma, un arī šajā

pētījumā iegūtie rezultāti norāda, ka līdzīgu purva nogulumu pētījumu veikšanai minētā antenu sistēma uzskatāma par piemērotu. Sagaidāms, ka ar 300 MHz antenu sistēmu purva nogulumos ir iespējams iegūt informatīvus signālus vismaz līdz 4,5 m dziļumam.

Elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums pētījumu teritorijā sastopamajos kūdras slāņos tika noteikts, izmantojot urbumu datus un laika aizturi, pēc kuras iegūti radiolokācijas signāli – tiek izmantots vidējais elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums. Aprēķinātā vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vidējā vērtība ir vienāda ar 74, kas kopumā uzskatāma par atbilstošu un raksturīgu purvu nogulumiem [11].

Dziļums, no kāda iegūti radiolokācijas signāli, tika aprēķināts, izmantojot vidējo elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu griezumā. Izmantotā metode uzskatāma par pietiekami precīzu, gadījumos, kad pētījumu teritorijā, izmantojot kūdras īpašības, iespējams izdalīt tikai dažus kūdras slāņus, kā arī tiek analizētas tikai atsevišķas kūdras īpašības. Gadījumos, kad pēc īpašībām izdalāmi vairāki kūdras slāņi, griezumā tiek identificētas vairākas robežas, kas var būt radiolokācijas signāla atstarojuma virsmas. Tādēļ, lai būtu iespējams veikt korektu iegūto signālu korelāciju ar kūdras īpašību maiņu griezumā, dziļumu, no kāda saņemti iegūtie signāli, jānosaka ar augstu precizitāti, izmantojot kopējā viduspunkta metodi [11]. Vairāki līdzīgu pētījumu autori izmanto un turpmākiem pētījumiem iesaka aprēķināt izmantot tikai vidējo elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu griezumā [4,12]. Tomēr veiktā pētījuma rezultāti liecina, ka, lai korekti interpretētu iegūtos radiolokācijas signālus, ir jāpielieto kopējā viduspunkta metodi.

Balstoties uz pētījuma laikā veikto kūdras īpašību analīžu rezultātiem, tika konstatēts, ka pētījumu teritorijā ir iespējams izdalīt atsevišķus kūdras slāņus pēc to mitruma daudzuma. Tā pētījumu teritorijā ir iespējams izdalīt četrus kūdras slāņus ar atšķirīgu mitruma daudzumu. Minētie slāņi ir izsekojami visā pētījumu teritorijā, un līdz ar to šo slāņu robežas ir uzskatāmas par iespējamām radiolokācijas signāla atstarojuma virsmām. Tomēr, veicot iegūto radiolokācijas signālu un kūdras slāņu ar atšķirīgu mitruma daudzumu robežu korelāciju, tika konstatēts, ka tikai dažus no iegūtajiem signāliem ir iespējams skaidrot ar mitruma daudzuma izmaiņām griezumā. Līdz ar to vairāku līdzīgu pētījumu autoru paustais viedoklis [2,3,8], ka purvu nogulumos iegūtie radiolokācijas signāli ir saistīti galvenokārt tikai ar mitruma izmaiņām griezumā, nav korekts.

Zināms, ka grunts minerālajām daļiņām, salīdzinot ar ūdeni, ir ievērojami zemāks vides dielektriskās caurlaidības koeficients [11], kas nozīmē to, ka pat nelielas mitruma daudzuma izmaiņas būtiski ietekmē elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu nogulumos. Tomēr pētījumā iegūtie rezultāti norāda, ka kūdras kopējā mitruma daudzuma izmaiņas pētījuma teritorijā ne vienmēr ierosina radiolokācijas signāla atstarojumu. Iespējams, ka detalizētāka atsevišķu ūdens veidu kūdrā analīze varētu sniegt kādu pamatotāku skaidrojumu, jo, piemēram, saistītā ūdens vides dielektriskās caurlaidības koeficients krasi atšķiras no brīvā ūdens vides dielektriskās caurlaidības koeficienta [13].

Izmantojot pētījuma laikā veikto kūdras īpašību analīžu rezultātus, tika konstatēts, ka pētījumu teritorijā kūdras pelnainības izmaiņas griezumā ir vienmērīgas. Rezultātā pētījumu teritorijā nav iespējams izdalīt kūdras slāņus, izmantojot nogulumu pelnainību. Kā izņēmums ir atzīmējams kūdras slānis 80 cm dziļumā, kam ir salīdzinoši augstāks pelnu saturs. Radarogrammā identificēto 6. signālu urbūmam U-1 atbilstošajā vietā ir iespējams saistīt ar minēto kūdras slāni, bet urbūmam U-2 atbilstošajā vietā 6. signāls tika saņemts no lielāka dziļuma (125 cm). Līdz ar to pētījumu teritorijā iegūtie signāli nevar tikt saistīti ar kūdras pelnainības izmaiņām griezumā, kas, pēc vairāku līdzīgu pētījumu autoru domām [4], var ierosināt radiolokācijas signāla atstarojumu. Tomēr jāatzīmē, ka dziļuma, no kāda saņemts 6. signāls, noteikšana nebija viennozīmīga un rezultātā tālāka signāla korelācija ar nogulumu īpašību izmaiņām griezumā nav uzskatāma par precīzu un pamatotu.

Balstoties uz pētījuma laikā veikto kūdras analīžu rezultātiem, konstatēts, ka pētījumu teritorijā ir iespējams izdalīt atsevišķus nogulumu slāņus pēc kūdras sadalīšanās pakāpes, bet visā pētījumu teritorijā ir izsekojama tikai viena robeža starp nogulumu slāņiem ar atšķirīgu kūdras sadalīšanās pakāpi. Identificēta robeža urbūmam U-1 tika konstatēta 235 cm dziļumā, kas atbilst 5. radiolokācijas signālam, bet urbūmam U-2 tā tika konstatēta 255 cm dziļumā, kas atbilst 4. radiolokācijas signālam. Tādējādi minēto robežu nav iespējams sasaistīt ar kādu no radarogrammā identificētajiem subhorizontālajiem signāliem. Vienlaicīgi iegūtajā radarogrammā netika identificēti signāli, kas būtu saistāmi ar kūdras sadalīšanās pakāpes lokālajām izmaiņām urbūma U-1 griezumā. Citu līdzīgu pētījumu autori ir atzīmējuši [4,5], ka kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas griezumā vairumā gadījumu ierosina radiolokācijas signāla atstarojumu, taču veiktā pētījuma rezultāti liecina, ka pat salīdzinoši krasas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas griezumā var arī neierosināt radiolokācijas signāla atstarojumu.

Analizējot iegūtos radiolokācijas signālus, uzmanība tika pievērsta signālu amplitūdai un tās izmaiņām radarogrammā visā profila garumā. Konstatēts, ka signāli, kas iegūti no lielāka dziļuma, ir ar salīdzinoši nemainīgu amplitūdu un tos ir iespējams identificēt visā radarogrammā. Minētais norāda, ka kūdras slāņi ir izturēti un to īpašības ir salīdzinoši nemainīgas visā pētījumu teritorijā. Signāliem no neliela dziļuma, pretēji raksturīgas amplitūdas izmaiņas plašā intervālā un atsevišķās radarogrammas vietās šo signālu identificēšana ir apgrūtināta.

Kopumā šāds signālu raksturs norāda uz kūdras slāņu heterogenitāti un tā pētītajā teritorijā novērojama līdz 260 cm dziļumam. Savukārt radarogrammā identificētie signāli liecina par izteiktu kūdras heterogenitāti aptuveni līdz trīs metru dziļumam. Tādējādi, balstoties uz minēto radiolokācijas signālu amplitūdas raksturojumu un iegūtajiem kūdras analīžu rezultātiem, pētījumā tika apstiprināta hipotēze par iespējamību pēc radiolokācijas signāla amplitūdas raksturot kūdras slāņu īpašības.

Analizējot iegūtos radiolokācijas signālus, tika vērtēta to polaritāte un tās izmaiņas, salīdzinot ar signālu, kas ceļojis tieši no raidītāja uz uztvērēju.

Kopumā iegūto signālu polaritātes noteikšana vairumā gadījumu ir viennozīmīga, tomēr tās noteikšana ir apgrūtināta signāliem ar salīdzinoši zemu amplitūdu, kā arī signāliem, kurus ir grūti izšķirt. Iegūtajā radarogrammā identificētais 1. signāls (sk. 7. att.), kas tika saistīts ar purva gultni, ir vienā fāzē ar tiešo signālu. Tas bija sagaidāms, jo elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums purva nogulumos ir mazāks nekā elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums smilšainos nogulumos [11]. Radarogrammā identificētais 2. signāls tika saistīts ar mitruma daudzuma izmaiņām griezumā – tas ir ar robežu starp diviem kūdras slāņiem, kur paguļošā slāņa mitruma daudzums ir lielāks nekā uzguļošā slāņa mitruma daudzums. Balstoties uz to, ka, palielinoties mitruma daudzumam, elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums grunts slānī samazinās [11], minētajam signālam būtu jābūt pretējā fāzē ar tiešo signālu, kas arī tika konstatēts. Līdz ar to pētījuma laikā tika apstiprināts, ka iegūto signālu polaritāti var izmantot kūdras slāņu dielektriskās caurlaidības vērtību savstarpējai salīdzināšanai.

SECINĀJUMI

Veiktais pētījums parāda, ka kūdras pētījumos ar radiolokācijas metodi elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums kūdras slāņos jānosaka ar augstu precizitāti, izmantojot kopējā viduspunkta metodi. Vidējās ātruma vērtības izmantošana ir attaisnojama tikai atsevišķos gadījumos, kad iegūtajiem ģeofizikālajiem mērījumiem nav nepieciešama augsta precizitāte.

Izmantojot iegūto signālu amplitūdu un polaritāti, var noteikt kūdras slāņu īpašības un savstarpēji salīdzināt to vides dielektriskās caurlaidības koeficientus.

Līdzšinējos pētījumos dominējošais secinājums, ka elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu kūdrā nosaka tikai kūdras mitruma daudzuma izmaiņas, ir kļūdainas. Veiktais pētījums norāda, ka šīs atkarības ir ievērojami komplicētākas, tomēr vienkāršotiem lietišķiem un aptuveniem aprēķiniem tās var tikt izmantotas arī turpmāk.

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 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)” un ESF projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē – 2” (Nr. 2011/0054/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/002) atbalstu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] **Bogorodskijs, V.V., Trepovs, G.V.** Kūdras un sapropeļa iegulu biežuma mērījumi ar radiolokācijas metodi. *Tehniskās fizikas žurnāls*, 1979, s. 49, 670 - 673 lpp.

- [2] Comas, X., Slater, L., Reeve, A. Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. *Journal of Hydrology*, 2011, vol. 399, p. 173-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.031>
- [3] Plado, J., Sibul, I., Mustasaar, M., Joelleht, A. Ground – penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia. *Estonian journal of earth sciences*, 2011, vol. 60, p. 31 – 42.
- [4] Slater, L.D., Reeve, A. Case history: investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics*, 2002, vol. 67, p. 365–378. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1468597>
- [5] Kettridge, N., Comas, X., Baird, A., Slater, L., Strack, M., Thompson, D., Jol, H., Binley, A. Ecohydrologically important subsurface structures in peatlands revealed by ground-penetrating radar and complex conductivity surveys. *Journal of Geophysical Research*, 2008, vol. 113, G04030. doi:10.1029/2008JG000787.
- [6] Musgrave, H., Binley, A. Revealing the temporal dynamics of subsurface temperature in a wetland using time-lapse geophysics. *Journal of Hydrology*, 2011, vol. 396, p. 258-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.008>
- [7] Van Bellen, S., Dallaire, P.L., Garneau, M., Bergeron, Y. Quantifying spatial and temporal Holocene carbon accumulation in ombrotrophic peatlands of the Eastmain region, Quebec, Canada. *Global Biogeochem. Cycles*, 2011, vol. 25, GB2016, doi:10.1029/2010GB003877. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GB003877>
- [8] Holden, J., Burt, T.P., Vilas, M. Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, vol. 27, p. 235–249. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.316>
- [9] Reynolds, M.J. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex, John Wiley & Sons, 1997, p. 682 – 745.
- [10] Krūmiņš, J., Silamiķele, I., Purmalis, O., Stankeviča, K., Kuške, E., Pujāte, A., Ozola, I., Ceriņa, A., Rūtiņa, L., Stivriņš, N. *Kūdras un sapropeļa pētījumu metodes*. Latgales drukā, Rīga, 2012. 80 lpp.
- [11] Neal, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 2004, vol. 66, p. 261–330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- [12] Oliveira, M., Porsani, J., Lima, G., Jeske-Pieruschka, V. & Behling, H. Upper Pleistocene and Holocene peatland evolution in Southern Brazilian highlands as depicted by radar stratigraphy, sedimentology and palynology. *Quaternary Research*, 2012, vol. 77, p. 397 – 407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.12.006>
- [13] Bojarskijs, D.A., Tihonovs, V.V. *Saistītā ūdens ietekme uz mitru un sasalušu grunšu dielektrisko caurlaidību*. Maskava, Kosmisko pētījumu institūts RAN, 2003, 48 lpp.

Jānis Karušs, Mg.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

Jānis Karušs, Valdis Segliņš. The Analysis of Ground Penetrating Radar Signals Acquired in Cenas Tirelis

This research is devoted to the analysis and interpretation of ground penetrating radar signals obtained in bog deposits. Research goals are to find out peat physical properties that mainly determine peat electromagnetic properties and also to identify reflected ground penetrating radar signal properties and offer their geological interpretation.

This paper includes the description of research area geological structure, description of applied ground penetrating radar research methodology, results of peat humification analysis, results of organic matter content and moisture content analysis. In addition, the paper deals with the detailed ground penetrating radar signal analysis, which includes the analysis of amplitude and phase of the obtained ground penetrating radar signals. Attention was also paid to possibilities to identify the obtained ground penetrating radar signals.

The results obtained in this research indicate that 300 MHz antenna system is applicable to performing similar studies. It is expected that with 300 MHz antenna system informative ground penetrating radar signals will be obtained from the depth of 4.5 meters. Data analysis shows that in boreholes it is possible to identify 4 peat layers with different moisture content, that are traceable throughout research area. Boundaries between these layers are considered to be possible reflection surfaces of ground penetrating radar signal. It is also possible to trace boundaries between peat layers with different degree of humification throughout research area. Boundaries between peat layers with different ash content which are traceable throughout research area were not identified in this research.

It is concluded that an electromagnetic wave propagation speed in peat layers must be determined with high precision using a common midpoint method and in previous studies the opinion has been expressed that an electromagnetic wave propagation speed in peat layers determines only moisture content is incorrect.

Янис Карушс, Валдис Сеглиньш. Анализ радиолокационных сигналов, полученных в болоте "Ценас"

Исследование посвящено анализу и интерпретации радиолокационных сигналов, полученных в болотных отложениях. Цель исследования - выявить физические свойства торфа, которые главным образом определяют электромагнитные свойства торфа, а так же идентифицировать свойства отраженных сигналов и предоставить их геологическую интерпретацию. Дано описание геологического строения изучаемой территории, а так же, описание используемой методики радиолокационных исследований, результаты анализов степени разложения, содержания пепла и естественной влажности торфа. Так же представлен детальный анализ полученных радиолокационных сигналов, в котором рассмотрена амплитуда и полярность сигналов, а так же возможности их идентификации на полученных радиограммах. Результаты исследования показывают, что для проведения подобных исследований болотных отложений подходит система антенн в 300 МГц. Предположительно, с системой антенн в 300 МГц возможно получать информативные сигналы в болотных отложениях, по меньшей мере, до глубины 4,5 м. Анализ данных показывает, что в разрезах скважин можно выделить 4 слоя торфа с разной степенью влажности, которые прослеживаются по всей исследуемой территории. Границы данных слоев считаются возможными поверхностями отражения радиолокационного сигнала. Так же на всей территории исследования возможно выделить границы слоев торфа с резкими изменениями степени разложения. Границы между слоями торфа с резко изменчивым содержанием пепла, которые бы прослеживались по всей исследуемой территории, выделить невозможно. Сделан вывод, что скорость распространения электромагнитных волн в слоях торфа следует определять с высокой точностью, используя метод общей средней точки, а так же, что доминирующее в предыдущих исследованиях мнение, что скорость распространения электромагнитных волн в торфе обуславливается только изменением степени влажности торфа, ошибочно.