

GEOFIZIKINIŲ TYRIMŲ GEORADARU TAIKYMAS ARCHEOLOGINIAMS IR INŽINERINIAMS UŽDAVINIAMS SPREŠTI

DAINIUS MICHELEVIČIUS, MANTAS BUDRAITIS

Vilniaus universitetas

Dr. Dainius Michelevičius – Vilniaus universiteto Gamtos mokslų fakulteto Geologijos ir mineralogijos katedros lektorius, UAB „Geobaltic“ direktorius. Be pagrindinės darbo krypties – seisminių duomenų interpretacijos ir naftos perspektyvumo įvertinimo projektų organizavimo ir vykdymo, užsiima georadaro taikymu archeologinių ir inžinerinių uždavinų sprendimui Lietuvoje.

Mantas Budraitis – geologas, geofizikas, Vilniaus universiteto geologijos mokslų doktorantas, UAB „Geobaltic“ geofizikas. Yra paskelbęs publikacijų georadaro taikymo archeologiniuose tyrimuose srityje: „Pirmieji archeologinių objektų 3D tyrimai georadaru Lietuvoje“, Acta Historica Universitatis Klaipedensis, atiduota spaudai; D. Michelevičius, E. Visakavičius, M. Budraitis, „3D tyrimų georadaru taikymas archeologiniams, geologiniams ir inžineriniams uždaviniams spręsti“, Geologijos akiračiai, Vilnius, 2008, Nr. 1, p. 24–29.

Ivadas

Pastaruoju metu, itin sparčiai tobulėjant sekliajai geofizikinei įrangai ir plečiantis jos taikomumo riboms, atsiranda vis daugiau potencialių šiu tyrimų vartotojų. Anksčiau sekliosios geofizikos metodai dažniausiai buvo taikomi geologiniams ir inžineriniams uždaviniams spręsti, o dabar šie metodai itin sėkmingai panaudojami ir archeologiniuose tyrinėjimuose. Reiktu pažymėti, kad nedestrukciniai metodai kai kuriose Europos šalyse netgi yra privalomi prieš pradedant standartinius archeologinius kasimo darbus.¹

Iki XX a. septintojo dešimtmecio pasaulyje laikytasi nuostatos, kad vienintelis archeologinių vertybų išsaugojimo būdas yra tyrimai *in situ*, kai teritorija archeologiškai ištyrinėjama iki galo, joje glūdinti informacija dokumentuojama, radiniai perduodami į muziejus. Šis archeologinių tyrimų metodas sunaikina visą tyrinėjamos teritorijos kultūrinį sluoksni. Daugelyje valstybių buvo suvokta, kad archeologinių kasinėjimų metu prarasta informacija yra negrūžtama, todėl entuziazmas besti kastuvą į žemę gerokai priblēso. 1990 m. spalio 10 d. Lozanoje ICOMOS IX Generalinė asamblėja priėmė Archeologijos paveldo apsaugos ir priežiūros chartiją, kurioje nustatė, kad archeologijoje visų pirma turėtų būti taikomi tausojantieji tyrimų metodai. Ši nuostata išliko 1992 m. pataisytoje Europos archeologijos paveldo apsaugos konvencijoje (dar vadinamoje Maltos konvencija). Šiuose dokumentuose nurodoma, kad šalys išpareigoja išsaugoti archeologijos paveldą ir užtikrinti jo mokslinius tyrinėjimus. XX a. aštuntajame dešimtmetyje nedestrukciniai tyrimų metodai prioritetu tapo Didžiojoje Britanijoje², kiek vėliau imti nuosekliai taikyti Vokietijoje ir Lenkijoje³.

Vienas plačiausiai sekliuose geologiniuose, inžineriniuose ir archeologiniuose tyrimuose taikomų nedestrukcinių metodų – georadaras (*ground penetrating radar*), kuris, esant geroms sąlygoms, leidžia tirti požeminę sąrangą iki kelionės metrų gylio. Naujos kokybės georadaro taikymo pradžia sietina su erdiniais (3D) tyrimais, kurie pradėti vykdyti pastaruoju dešimtmeciu, kai patobulėjo šiuolaikinė programinė įranga, pritaikyta rinkti, apdoroti ir analizuoti itin didelius šiu specifinių duomenų kiekius.

Lietuvoje pirmieji tyrimai georadaru atlikti daugiau nei prieš dešimtmetį Lietuvos geologijos tarnyboje, kai joje buvo įkurtas Geofizikos skyrius ir sudaryta seklių geofizinių tyrimų programa. Tai buvo bandomieji 2D tyrimai skirtingo tipo geologiniuose objektuose. Dėl riboto georadaro tyrimų gylio buvo nuspręsta, kad geologijoje jis menkai taikytinas, todėl vėliau buvo atliekami tik pavieniai tyrimai, daugiau orientuoti į inžinerinius uždavinius, tokius kaip vamzdžių ir kabelių aptikimas. Nuo 2004 m. UAB „Geobaltic“ pradėta diegti 3D metodika. Sėkmingas jos pritaikymas rado savo nišą archeologiniuose tyrinėjimuose – tai sietina su tuo, kad dauguma archeologus dominančių objektų aptinkami iki 1–2 metrų gylio, nesunkiai pasiekiami georadaro bangomis, esant įvairiems gruntams. Šiame straipsnyje pateikiame įdomesni 3D tyrimų georadaru pavyzdžiai, sukaupti UAB „Geobaltic“ bazėje per pastarajį laikotarpį.

Tyrimo metodika

Georadaro veikimo principas paremtas elektromagnetinių bangų atspindžiu – siūstuvu siunčiama elektromagnetinė banga, kuri sklinda gruntu gilyn ir yra atspindima nuo ribų, pasižyminti skirtingomis elektrinėmis savybėmis. Atispindėjęs signalas yra fiksuojamas georadaro antenoje ir registruojamas nešiojamajame kompiuteryje.

Georadaro prasiskverbimo gylis priklauso nuo jo naudojamo elektromagnetinių bangų virpesių dažnio ir nuo grunto elektrinių savybių. Didėjant dažniui gerėja georadaro skiriamoji geba, bet mažėja prasiskverbimo gylis, o didėjant grunto elektriniam laidumui didėja elektromagnetinio lauko energijos išsklaidymas (sugėrimas) Jame, dėl to prasiskverbimo gylis irgi sumažėja. Taigi smėlyje ir žvyre, kurių varžos, palyginti su priemoliu ir moliu, yra didelės, prasiskverbimo gylis gali siekti 15–20 metrų, o priemolyje ir molyje gali tesiekti keletą dešimčių centimetru.

Paprasčiausias georadaro naudojimo atvejis – matavimas viename taške, kai nejudantis georadaro siūstuvas išspinduliuoja trumpą aukšto dažnio signalą ir dalis jo energijos, sklindančios gilyn, priklausomai nuo jo kelyje pasitaikančių objektų elektrinių savybių yra atspindima, o kita dalis sklinda toliau gilyn, ir šis procesas kartojasi. Georadaro imtuve kas labai mažą laiko intervalą (0,2 ns)

registrojamas atspindėtosios elektromagnetinės energijos dalies amplitudės kitimas, ir taip gaunama elektromagnetinės energijos amplitudės priklausomybė nuo laiko, vadinamoji trasa. (**1a pav.**)

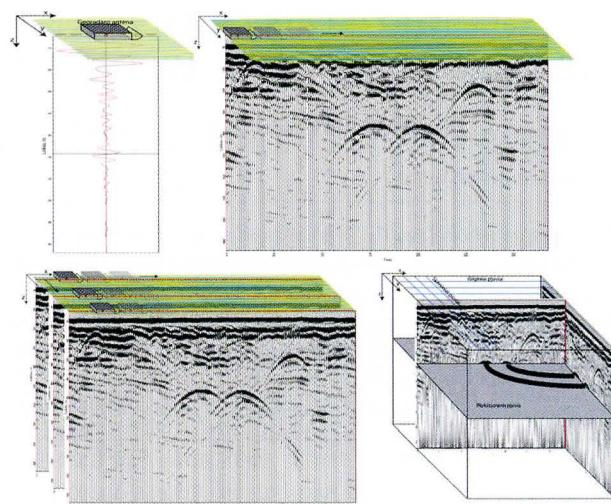
Georadaro antenai slenkant žemės paviršiumi ir registrojant trasas norimą atstumą, gaunamas profilis, t. y. 2D atspindėtos elektromagnetinės energijos priklausomybė nuo laiko. (**1b pav.**)

Toliau plečiant tyrimus ir rikiujant profilius vieną prie kito, gaunamas atitinkamas plotas, padengtas taškiniais matavimais (trasomis). Šiuo atveju tai trimatis atspindžio amplitudžių masyvas – 3D kubas. (**1c pav.**)

Pagrindinis 3D tyrimų georadaru privalumas – galimybė analizuoti atspindžio amplitudžių pasiskirstymą ne tik profiliuose, bet ir plokštuminiuose pjūviuose (**1d pav.**), kuriuose gauname informaciją apie aptikto objekto geometriją, o tai itin svarbu tiriant įvairius archeologinius objektus, pvz., tokius kaip sienų liekanos, pamatai, kapavietės, vandentiekio sistemos ir pan.

Atliekant 3D lauko darbus, svarbu teisingai parinkti darbinius parametrus, tarp kurių svarbiausi yra georadaro naudojamas dažnis ir atstumas tarp taškinų matavimų (trasų). Georadaro dažnis lemia vertikalają skiriamąją gebą, kuri gali kisti nuo kelių centimetru (esant 2GHz dažniui) iki keleto metrų (100 MHz dažnis). Tuo tarpu atstumas tarp trasų turi būti parinktas taip, kad nebūtų „praziopsoti“ norimi išskirti objektai. Akivaizdu, kad tiriant metrinėmis bangomis neverta rinkti duomenų kas kelis centimetrus ir atvirkščiai.

Dauguma toliau aprašomų objektų buvo tiriami naudojant 500 MHz dažnį, registrojant trasas kas 10 cm profilių kryptimis ir 30 cm tarp profilių. Tad galutiniame duomenų masyve viena trasa teikia informaciją apie 10 x 30 cm ploto stulpelį. Renkant duomenis tokiu tankumu, per dieną su dabar esamomis pajėgomis galima ištirti 0,2 ha plotą.

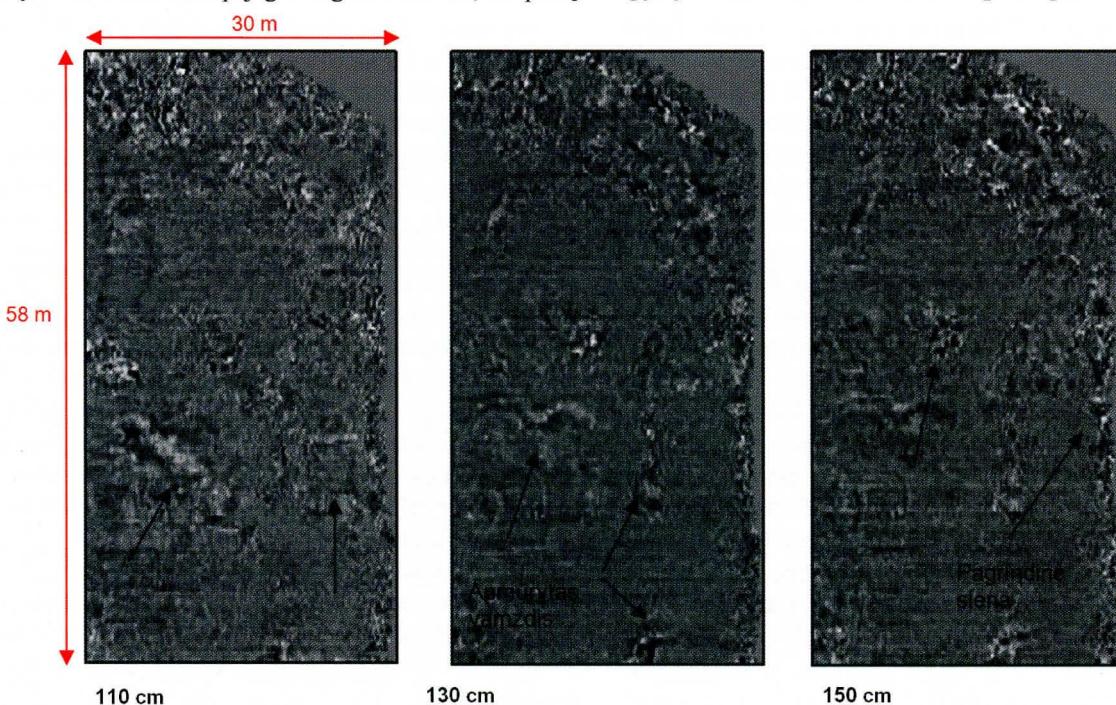


*I pav. Tyrimų georadaru metodikos schema: a) taškinis matavimas; b) profiliiniai (2D) tyrimai; c) erdviniai (3D) tyrimai; d) 3D tyrimų masyvo vaizdavimas ir plokštuminis pjūvis.
Description of survey types of Ground Penetrating Radar: a) point measurement (trace acquired); b) line measurement (2D profile acquired); c) plane measurement (3D cube acquired) and a horizontal slice.*

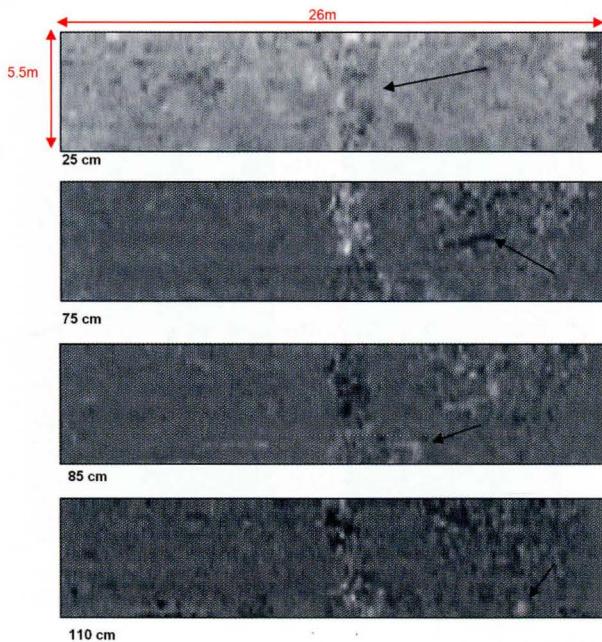
Tyrimų rezultatai

Mūrinių statinių sienų ir pamatių liekanos

Tyrimai, kurie buvo vykdyti Senųjų Trakų piliavietėje 2007 m., apėmė 30 x 58 m plotą, esantį 20 metrų į pietus nuo Viešpaties Apreiškimo Šv. Mergelei Marijai ir Šv. Benedikto bažnyčios sienos. Vakarinis tiriamojo ploto kraštas pasibaigė ties medžių juosta, šalia kurios ankstesniais tyrimais buvo aptiktas gynybinės sienos mūras. **2 pav.** pateikiame tris



*2 pav. Senųjų Trakų piliavietės tyrimų plokštuminiai pjūviai įvairiame gylyje.
Horizontal depth slices of Senieji Trakai castle site.*



3 pav. Dubingių piliavietės bažnyčios tyrimų plokštuminiai pjūviai įvairiuose gyliuose.

Horizontal depth slices of church site on Dubingiai mound.

plokštuminius pjūvius, esančius 110, 130 ir 150 cm gylyje. Juose gerai matyti pagrindinė gynybinė siena, be to, 9 metrų atstumu nuo jos aptinkamas kitas linijinis objekta, kuris gali būti siejamas su kita lygiagrečiai einančia siena. Pjūviuose taip pat matomos skirtingu formų anomalijos (paveiksle parodytos rodyklėmis), tikriausiai atitinkančios kitų buvusių piliavietės statinių liekanas.

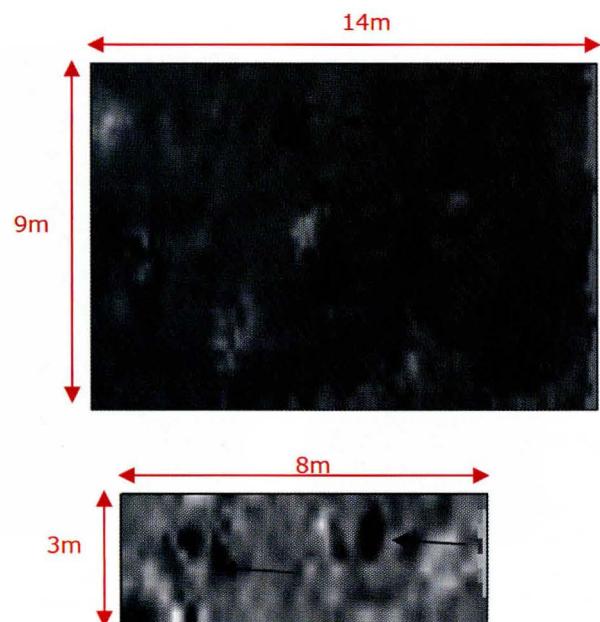
Kitas objekta, kuriame 2007 m. buvo tirtos mūro liekanos – Dubingių piliavietė. Čia tyrimai buvo atlikti 5,5 x 26 m plote virš dar archeologų neištirtos buvusios bažnyčios pamatų dalies. **3 pav.** parodyti plokštuminiai pjūviai, esantys 25, 75, 85 ir 110 cm gylyje. Visuose pjūviuose gerai matoma pagrindinė siena, einanti per tiriamojo ploto vidurį. Taip pat gerai išskiria ir daugiau įvairių formų anomalijų, siejamų su kitomis bažnyčios konstrukcijomis.

Kapaviečių lokalizavimas

2008 m. bandomieji kapaviečių tyrimai buvo atlikti Klaipėdoje, XIX a. Bandužių kapinėse ir to paties amžiaus Smeltės kapinaitėse. Pirmajame objekte buvo ištirtas 9 x 14 m plotas, kitame – mažesnis 3 x 8 m plotas. Abiejų objektų plokštuminiai pjūviai pateikti **4 pav.**, o juose matomos kapavietės pavaizduotos rodyklėmis.

Dvaro parkų struktūros tyrimai

2008 m. ištirtas Užutrakio dvaro rūmų pietinis parteris, kuriame apréptas 55 x 27 m plotas, siekiant išsiaiškinti tame buvusių apželdinimų vietas, sodo ornamentus ir takų padėtį. Apatinė trito ploto dalis šliejasi prie dvaro rūmų pastato, o dešinioji – prie ežero



4 pav. Bandužių (viršuje) ir Smeltės (apačioje) kapinių tyrimų plokštuminiai pjūviai.

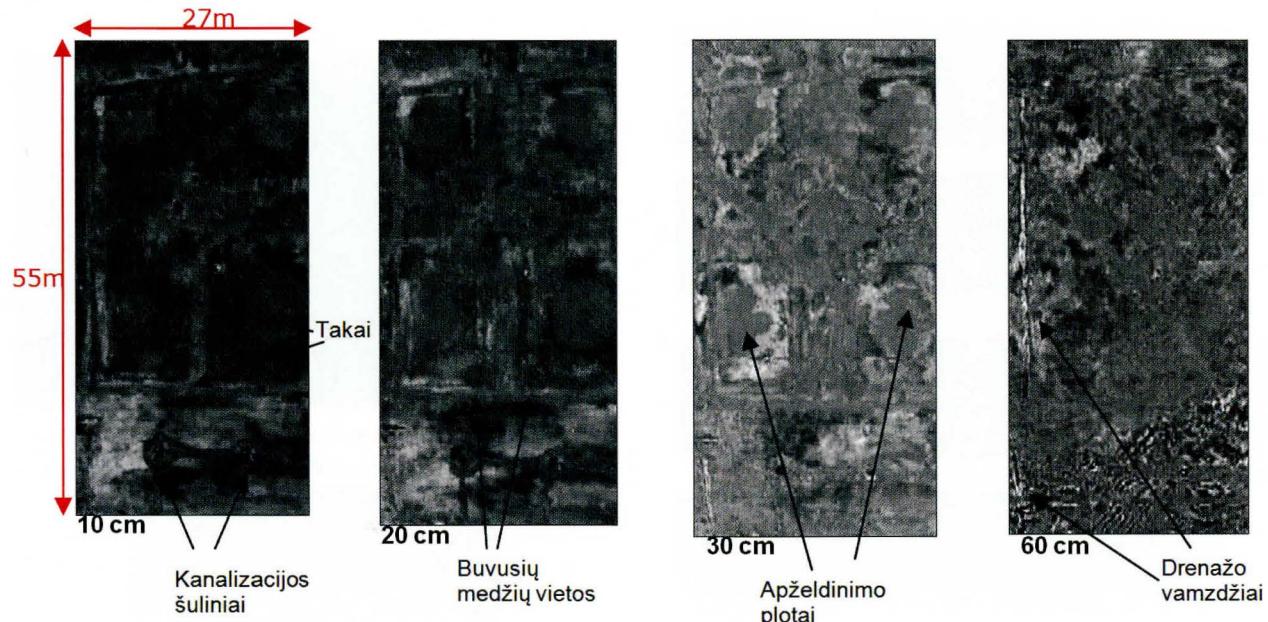
Horizontal depth slices of Bandužiai (upper) and Smeltė (lower) cemetery sites.

kranto. Reiktų paminėti, kad šiandien visas tiriamasis plotas yra užsėtas žole. Plokštumiųose pjūviuose nuo 10 iki 40 cm gylio matoma pagrindinė parterio struktūra, kurią sudaro 4 apskritimo formos apželdinti plotai, atskirti vienas nuo kito statmenai einančiais takais. Itin įdomūs 30 ir 40 cm gylio pjūviai, kuriuose minėtų apskritimų centre matomi dobilo lapo formas ornamentai, tikriausiai atspindintys ankstesnių laikų parterio apželdinimą. Taip pat ir 20 ir 30 cm gylio pjūviuose galima matyti daugiau mažesnių apskritimo formos objektų, kurie atitinka buvusių medžių sodinimo vietas. (**5 pav.**)

Tiriamajame plote gerai išskiria ir įvairios komunikacijos. Pagrindinis kanalizacijos griovys, jungiantis 3 kanalizacijos šulinius, matomas apatinėje trito ploto dalyje, yra praktiškai visuose pjūviuose. Pradedant nuo pjūvio, esančio 20 cm gylyje, gerai išskiria ir mažesnio diametro šiaurės pietų kryptimi nutišęs kanalizacijos vamzdis, kuris prasideda prie pat rūmų ir užsibaigia tikriausiai paviršiuje nematomu kanalizacijos šuliniu. Pjūviuose gerai matomas ir drenavimo griovys kairiajame ploto pakraštyje, kuris toliau statmenai užsisuka ir nueina ežero link. Pats drenažo vamzdis akivaizdžiai išskiria 60 cm gylyje.

Požeminių komunikacijų lokalizavimas

Vienas dažniausiu georadaro pritaikymo būdų – vamzdžių ir kabelių lokalizavimas. Iš toliau pateikiamo pavyzdžio matyti tyrimų, atliktų virš esamo komunikacijų tinklo Palangoje 2005 m., rezultatai. Ploto matmenys 15 x 5 m. Kaip matome, 3D tyrimais vamzdžių padėtis sėkmingesnai nustatoma ne tik plokštumoje, bet ir erdvėje. (**6 pav.**)

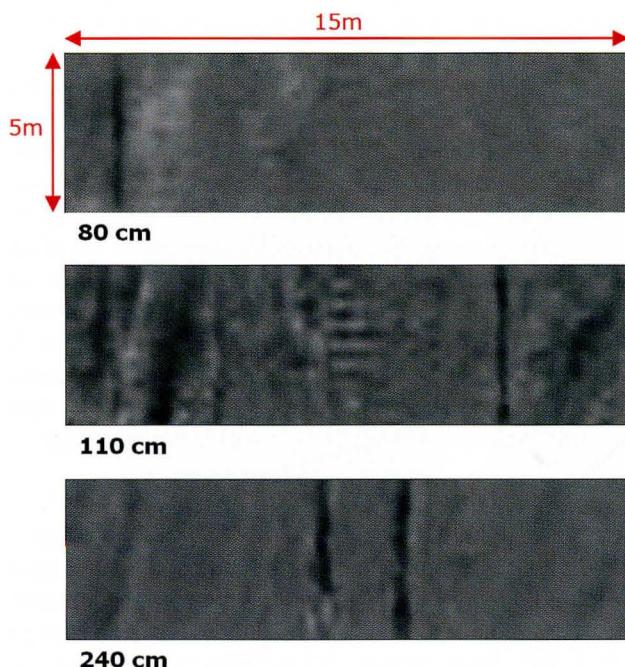


5 pav. Užutrakio dvaro parko tyrimų plokštuminiai pjūviai įvairiuose gyliuose.
Horizontal depth slices of Užutrakis Manor park site.

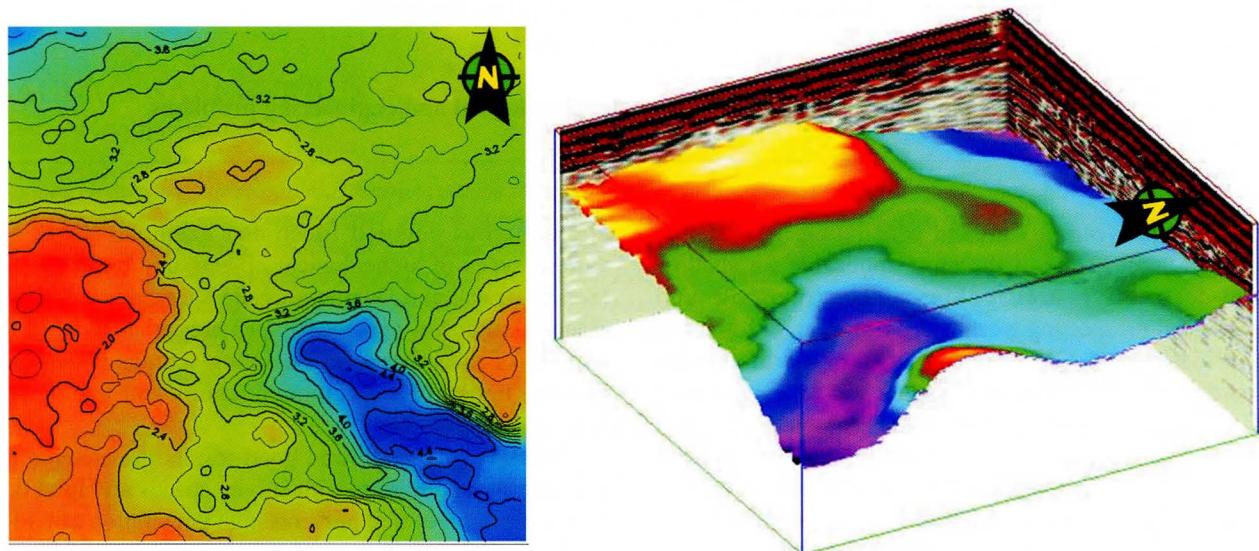
Detalus geologinis kartografovimas

Tyrimų plotas yra Klaipėdos–Šilutės plento 10-ajame kilometre. Tyrimų tikslas – kartografiuoti moreninio priemolio struktūrinį paviršių, kuris perdengtas smėlingomis nuogulomis. Pasirinktas plotas – 15 x 15 m, profiliai daryti kas 50 centimetru. Sudarytas 3D modelis, kurio tinklelis 10 x 50 cm. Modelyje smėlio ir moreninio priemolio riba labai ryški, tad po interpretacijos buvo

sudarytas struktūrinis moreninio paviršiaus žemėlapis. Šis žemėlapis yra labai detalus, ir netgi tokiamai mažame plote matomi ryškūs morenos kraigo gylio svyravimai. Pietvakarinėje ir vakarinėje dalyse matoma pakiluma, kurios aukštis iki 2 metrų nuo žemės paviršiaus, o pietrytinėje dalyje yra pailgos formos kraigo pagilėjimas su tūsa į tirto ploto centrinę dalį. (7 pav.)



6 pav. Požemininių komunikacijų tyrimų plokštuminiai pjūviai ir erdinė vamzdžių rekonstrukcija.
Horizontal depth slices and spatial reconstruction showing locations of pipes.



7 pav. Trito ploto moreninio priemolio kraigo žemėlapis ir jo atitinkmuo erdvėje (dėl vaizdumo trimaciame vaizde pasuktas).
A map and a 3D image (rotated for better view) of top till surface.

Apibendrinimai ir išvados

Pirmieji 3D tyrimai georadaru parodė, kad metodas gali būti sėkmingai taikomas buvusių statinių sienų, pamatų, kapaviečių, vamzdžių lokalizavimui ir dvarų parkų tyrimams, taip pat seklių geologinių sluoksnių kartografavimui.

Archeologiniuose tyrimuose georadaras geriausiai pasiteisino lokalizuojant stambesnes sienų ir pamatų liekanas. Tokio tipo objektai geriausiai išskiriami tuomet, kai profiliavimo kryptis yra statmena jų tūsai. Geri rezultatai gauti ir kapaviečių tyrimuose, tačiau reikėtų atsižvelgti į tai, kad tirtieji objektai yra palyginti nesenai (XIX a.), todėl neaišku, ar metodas pasiteisintų senesnėms laidojimo vietoms lokalizuoti. Georadaru itin sėkmingai aptinkami linijiniai inžineriniai objektai, pvz., vamzdžiai, kabeliai, drenažo kanalai. Jų padėtis tiksliai nustatomos ne tik plokštumoje, bet ir erdvėje. Metodas labai mažai taikytas 3D geologiniams tyrimams, kur jo potencialas gana didelis, ypač atliekant itin aukšto detalumo tyrimus smėlinguose gruntuose.

Vienas svarbesnių tokio tipo tyrimų privalumų, palyginti su kasinėjimo darbais, yra didelis produktyvumas, t. y. tyrimais galima apimti 0,2 ha plotą per dieną. Be abejo, georadaro (kaip ir bet kurio kito

geofizikinio metodo) tyrimų rezultatai negali būti interpretuojami vienareikšmiškai, nes panašias anomalijas gali sukelti tiek archeologiniai, tiek geologiniai ar inžineriniai objektai. Tačiau, mūsų manymu, tokie tyrimai yra tikslingi siekiant parinkti optimalias vietas kasinėjimo darbams.

Pagrindiniai metodo aprubojimai sietini su grunto elektriniu laidumu ir paviršiaus sąlygomis. Atlikus bandomuosius archeologinius tyrimus pastebėta, kad metodas netaikytinas tiktais esant visiškai molingam gruntui, tuomet, kai priemoliuose ir priesmeliuose dažniausiai pasiekiamas archeologus dominantis tyrimo gylis. Taip pat pastebėta, kad georadaro rezultatai labai iškreipiami esant nepalankiomis paviršiaus sąlygomis (aukšta žolė, krūmynai), todėl prieš pradedant darbus tikslingo tiriamuosius plotus paruošti taip, kad būtų užtikrintas kuo geresnis georadaro antenos kontaktas su žemės paviršiumi. Vertėtų pažymėti, kad informatyviausi rezultatai gauti Užutrakio dvaro parke, kur paviršius labai tiko darbui su georadaru.

Pabaigoje reiktų pasakyti, kad ne visas metodo potencialas yra išnaudotas, todėl tyrimų metodika toliau tobulinama siekiant pagerinti duomenų pozicionavimo, apdorojimo ir vizualizavimo galimybes ir padidinti lauko darbų produktyvumą.

Dainius Michelevičius, Mantas Budraitis
Vilnius University

3D GPR applications solving archaeological, geological and engineering problems
Summary

In recent years 3D ground penetrating radar (GPR) surveys became one of the most applicable for shallow non-destructive archaeological, engineering and geological prospecting worldwide. However, in Lithuania application of GPR survey was performed only sporadically. The scope of this work was to test potential of 3D GPR surveys for different archaeological objects in various soil conditions in Lithuania. The survey was carried out using Zond-12 (Latvia) GPR with 500 MHz antenna. All investigated objects were covered by 10x30 cm data grid with approximately 2 ha area total.

This work provides simplified theoretical material about GPR working basics and methodology. Then there

are numerous detailed illustrated examples covering various types of archeological objects like buried walls (Senieji Trakai and Dubingiai castle sites), ancient burial places (Bandužiai and Smeltė cemeteries in Klaipėda), remains of manor park past planting settings (Uzutrakis manor), underground communications and geological settings.

3D GPR survey showed good results in detection of the underground objects with survey speeds are up to 0,2 ha per day. Clayey soil prevents high penetration of GPR, so to carry out the survey successfully and get more precise results some requirements are needed, such as fine, plane surface, low or cut vegetation if possible.

¹ J. Milsom, *Field Geophysics*, Chichester, 2003; Lawrence B. Conyers, *Ground-Penetrating Radar for Archeology*, Walnut Creek, CA, 2004.

² C. Gaffney, J. Gater, *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archeologists*, Stroud, 2003.

³ K. Misiewicz, *Geofizyka archeologiczna*, Warszawa, 2006; Z. Kobyliński, „Problemy współczesnej teorii konserwacji dziedzictwa archeologicznego w Polsce”, *Współczesne problemy teorii konserwatorskiej w Polsce*, red. B. Szmygina, Warszawa–Lublin, 2008, p. 35–44.