

Svarbiausi elektrinės tomografijos naudojimo principai sprendžiant geologinius uždavinius

Rimantas Šečkus

Šečkus R. The main principles of the use of electrical tomography for geological purposes. *Geologija*. Vilnius. 2002. No. 38. P. 49–60. ISSN 1392-110X.

The first attempts to apply electrical tomography in Lithuania were made in 1996. Since that time this surface geophysical method was tested on different objects for solving various geological, hydrogeological, engineering geological, geoecological and even archeological tasks. The experience of domestic and foreign colleagues was used to explain how the peculiarities of the upper part of a geological cross-section are reflected in the geoelectrical models constructed in accordance with the measured field data sets. The main principles of acquisition, processing and interpretation of electrical tomography data are discussed. The use of the geoelectrical modeling procedures allows including the existing geological (as a rule from drilling) information more effectively in the interpretation process.

Keywords: electrical tomography, electrical resistivity, geoelectrical model, interpretation

Received: 20 March 2002, accepted 18 April 2002

Rimantas Šečkus, Vilnius University, Faculty of Natural Sciences, Department of Hydrogeology and Engineering Geology, M. K. Čiurlionio 21/27, LT-2009 Vilnius, Lithuania. Tel.: +(370-2) 331 012; Fax: +(370-2) 336 156. E-mail: rimantas.seckus@lgt.lt

ĮVADAS

Elektrinė tomografija (ET) – tai neseniai sukurtas elektrinės žvalgybos metodas, skirtas tirti sudėtingos geologinės sandaros pjūvius, kuriuos tiriant įprastais geofizinių tyrimų metodais negaunama teigiamų rezultatų. Ši tyrimų ir interpretacijos metodika pastaraisiais metais vis plačiau taikoma hidrogeologiniuose, inžineriniuose geologiniuose, geoekologiniuose, archeologiniuose bei kitokio pobūdžio tyrimuose, reikalaujančiuose patikimos informacijos apie požeminės erdvės sandarą. Tyrimų gylis bei išsamumas priklauso nuo įžeminamų grunto paviršiuje elektrodų skaičiaus ir atstumo tarp elektrodų. Teoriškai tyrimų gylis neribotas, tačiau praktiškai pasitenkinama pirmuoju šimtu metrų nuo žemės paviršiaus, nes techniškai sudėtinga tiriamoje vietovėje ištiesti vienoje linijoje kelių kilometrų ilgio kabelį. Apskritai metodika apima du seniai žinomus ir plačiai naudojamus metodus: vertikalų elektrinį zondavimą (VEZ) ir elektrinį profiliavimą (EP).

Lauko tyrimai atlikti CAMPUS Resistivity Imaging System aparatūra, pagaminta 1996 m. Birminghame (Anglija), tariamųjų varžų inversijai naudota dviejų dimensijų inversijos programa Res2Dinv (Loke, 1997), geoelektriniam modeliavimui – RES2DMOD (Loke, 1997). Dabar Lietuvoje esanti 50 elektrodų sistema leidžia atlikti tyrimus išilgai profilio, kurio didžiausias ilgis – 500 m. Šiuo atveju tyrimų gylis – iki 70–80 m.

Nuo 1996 m. ET Lietuvoje atlikta daugiau nei 30-ye objektų sprendžiant įvairiausius geologinius uždavinius (1 pav.). Bendras profilių ilgis sudaro apie 200 km. Svarbiausias geologinis rezultatas, gaunamas atlikus ET, yra pjūvio suskaidymas į atskirus sluoksnius, tačiau tam tikrais atvejais pagal ET duomenis buvo nustatytas gruntinio vandens lygis, pelkių sandara, požeminio vandens tarša ir kt. Ypač metodas pasiteisino atliekant tyrimus Lietuvos karsto rajone, kur, kaip žinia, nei gręžimas, nei kiti anksčiau taikyti geofiziniai tyrimo metodai dažnai buvo nepakankamai efektyvūs išsamesniems apibendrinimams.

Šiame straipsnyje pateikiami svarbiausi elektrinės tomografijos lauko darbų metodikos, gautų duome-

nų interpretacijos principai, parodoma, kaip galima panaudoti gręžimo duomenis ET duomenų geologinei interpretacijai pasitelkus tam tikslui geoelektrinį modeliavimą.

LAUKO DARBŲ METODIKA

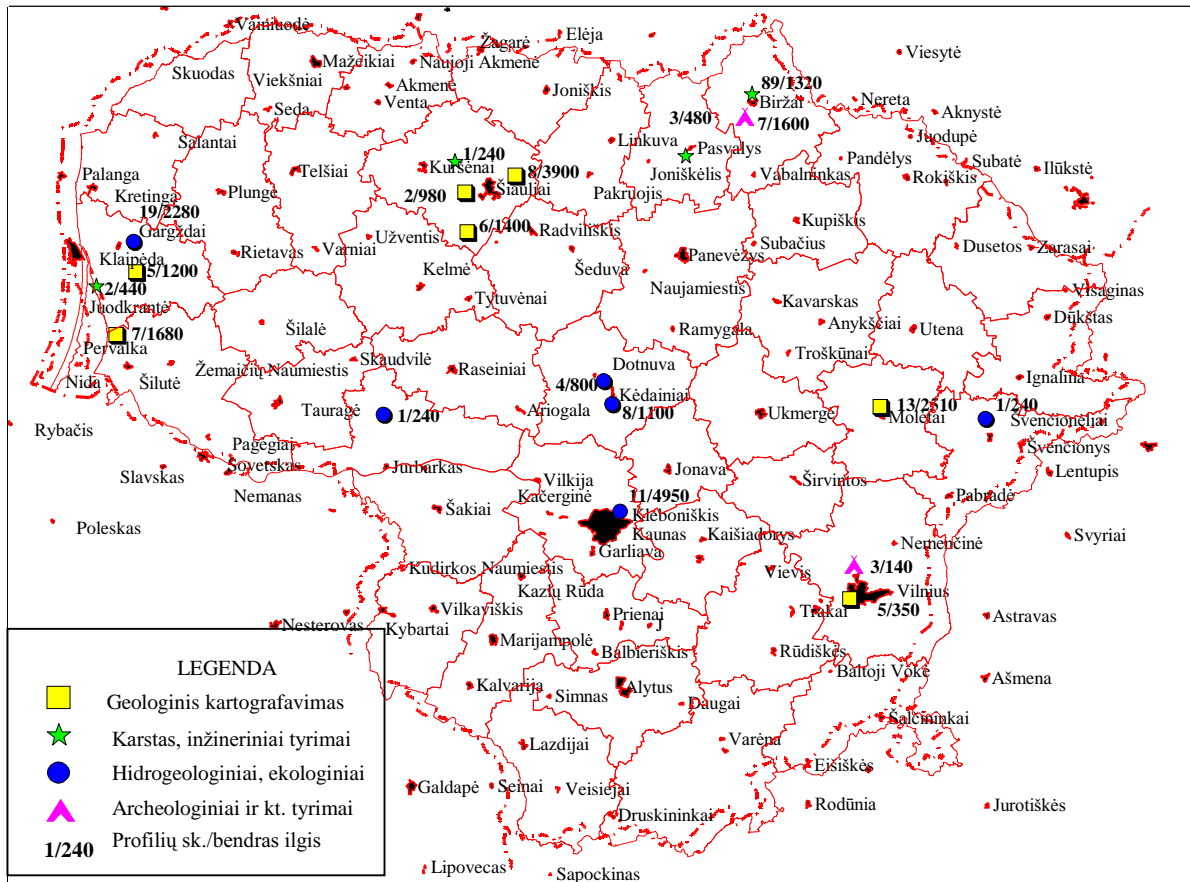
Tyrimai atliekami išilgai profilio, kuriame vienodais atstumais įžeminami elektrodai, kabeliu sujungti su valdančia ir matavimo aparatūra. Vieno matavimo ciklo metu panaudojami keturi elektrodai: du iš jų (C₁ ir C₂) prijungiami prie elektros srovės šaltinio ir per juos nutekanti į žemę srovė sukuria elektros lauką, o kiti du (P₁ ir P₂) skirti to lauko parametrų matuoti (2 pav., A). Didinant atstumą tarp srovės elektrodų didinamas tyrimų gylis bei mažinamas jų tikslumas. Taigi išilgai profilio atliekamas elektrinis profiliavimas skirtingame tyrimų gylyje, o gauta informacija padeda sudaryti uolienuų elektrinių savybių kaitos pjūvį. Priklausomai nuo sąlygų bei keliamų uždavinių profilyje galimos įvairios elektrodų porų išdėstymo kombinacijos. Iš elektrinio zondavimo teorijos žinomi ir labiausiai paplitę yra tyrimai Venerio, Šliumberže ir dipolio-dipolio linijomis. Tariamoji varža šioms linijoms yra apskaičiuojama pagal žinomą formulę:

$$\rho_t = K \cdot U/I \text{ } [\Omega\text{m}]; \tag{1}$$

Šliumberže linijai: $K = \pi[(L/2)^2 - (a/2)^2]/a$, Venerio linijai: $K = 2\pi a$, dipolio-dipolio linijai: $K = \frac{2\pi a}{n(n+1)(n+2)}$;

čia U – potencialų skirtumas tarp M ir N , I – darbo srovė, L – atstumas tarp srovės elektrodų, a – atstumas tarp įtampą matuojančių elektrodų, n – kartotinis a skaičius.

Elektrinės tomografijos tyrimo procesas yra visiškai automatizuotas, tiek duomenų rinkimo, tiek ir jų apdorojimo atžvilgiu. Elektrodų prijungimo prie srovės šaltinio arba voltmetro procesas per specialų IMAGER50 modulį valdomas programa, kuri realizuojama prie GEOPULSE varžų matuoklio prijungtu asmeniniu kompiuteriu. Visi matavimų rezultatai talpinami kompiuterio atmintyje. Valdymo programą galima keisti, kartu keičiama matavimų sistema, prijungiant skirtingas elektrodų konfigūracijas. Vieno profilio tyrimo metu paprastai atliekama nuo 100 iki 400 matavimų. Kiekvieno matavimo ciklo tariamosios varžos reikšmė, apskaičiuota pagal formulę (1), priskiriama atitinkamam geoelektrinio pjūvio blokui, kurio erdvinė padėtis profilyje priklauso nuo atstumo tarp srovės elektrodų matavimo metu (2



1 pav. Objektų, kuriuose atlikta elektrinė tomografija sprendžiant įvairius uždavinius, žemėlapis
Fig. 1. Map of the objects where electrical tomography was applied for different geological purposes

pav., B). Taip gaunamas tariamųjų varžų rinkinys atitinkamuose pjūvio taškuose ir naudojant paprastą interpoliaciją sudaromas įprastas elektrinėje žvalgyboje tariamųjų varžų ρ_t pjūvis (3 pav., A), kuriame

$$\rho_t = F(X, Z); \quad (2)$$

čia X – atstumas nuo profilio pradžios, Z – pseudogylis, t. y. $\frac{1}{2}$ atstumo tarp srovės elektrodų.

Gautos tariamųjų varžų pjūvis yra galutinis lauko darbų rezultatas, pačiu bendriausiu būdu (labai schematiškai) atspindintis požeminę geoelektrinę situaciją.

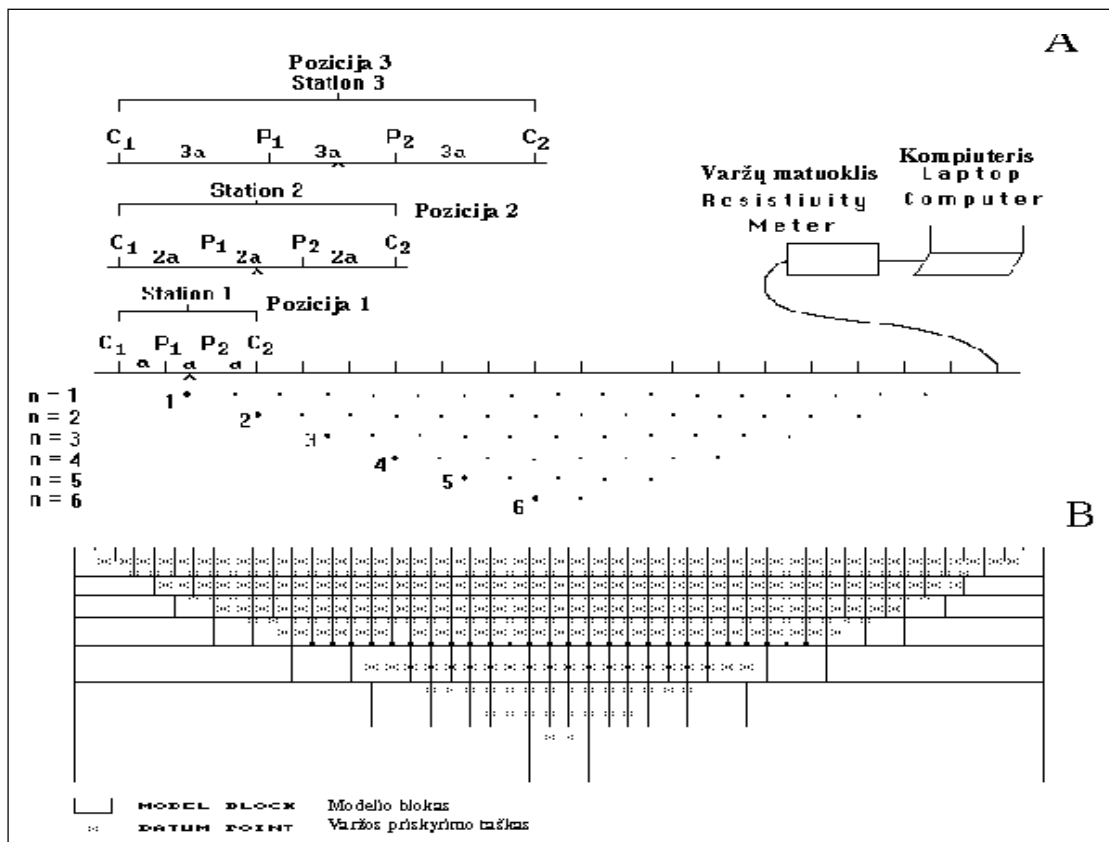
GAUTŲ DUOMENŲ APDOROJIMAS IR INTERPRETACIJA

Kaip ir visų elektrinės žvalgybos metodų, taip ir elektrinės tomografijos galimybė tirti požeminę sandarą grindžiama tuo, kad uolienos bei kiti žemiau žemės paviršiaus slūgsantys objektai skiriasi vieni nuo kitų elektrinėmis savybėmis – šiuo atveju savo savitąja elektrine varža (toliau – varža). Dažniausiai uolienos varža priklauso nuo dviejų pagrindinių veiksnių: vandens kiekio uolienoje ir vandenyje ištirpusių druskų koncentracijos, turint omenyje, kad sausa uoliena praktiškai yra kaip izoliatorius. Kuo daugiau uolienoje vandens ir kuo daugiau jame ištirpusių druskų,

tuo mažesnė uolienos varža, todėl skirtingos genezės, litologinės sudėties bei vidinės struktūros uolienos skiriasi savo varža (lentelė). Platus uolienų varžų pokyčio diapazonas (nuo 10^{-2} iki 10^5 Omm ir daugiau), viena vertus, lemia gerą ir smulkiają jų diferenciaciją pagal šio parametro dydį, tačiau, kita vertus, varžos geologinė interpretacija gali būti nevienareikšmė, nes visiškai skirtingos geologiniu požiūriu uolienos gali turėti vieną ir tą pačią varžą, pvz., žvirgždas ir klintis arba priemolis ir molingas mergelis ir pan. (žr. lentelę).

Galutinis elektrinės tomografijos tikslas yra išskirti pjūvyje objektus su skirtingomis varžomis, nustatyti tų objektų ribas bei jų slūgsojimo gylį ir suteikti išskirtiems požeminiams objektams geologinę prasmę. Sprendžiant šį itin sudėtingą uždavinį skiriama keletas etapų:

- gautos tariamųjų varžų reikšmės priskiriamos atskiriems modelio blokams (2 pav., B) ir pagal jas tariamosios varžos paskirstomos pjūvyje išilgai profilio (3 pav., A);
- sudaromas tikrųjų varžų pasiskirstymo pjūvyje teorinis modelis, geriausiai atitinkantis tariamųjų varžų pasiskirstymą (3 pav., B);
- atliekama geologinė elektrinio modelio interpretacija.



2 pav. Matavimų principinė schema atliekant elektrinę tomografiją (A) ir tariamųjų varžų pjūvio blokai bei tariamųjų varžų priskyrimo taškai (B)

Fig. 2. Principal scheme of electrical tomography measurement (A) and arrangement of the blocks used in a model of apparent resistivities together with the datum points in the pseudosection (B)

Lentelė. Kai kurių nuosėdinių uolienu savitosios elektrinės varžos
Table. Specific electrical resistivity of some rocks
(pagal V. Telford ir kt., 1980, Ogilvi, 1990)

Uoliena	Savitoji elektrinė varža Omm				
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴
Nesuardytas dirvožemis			— — — — —		
Įvairiagrūdis smėlis			— — — — —	— — — — —	
Molingas smėlis (iki 5% molio)			— — — — —		
Priesmėlis			— — — — —		
Priemolis			— — — — —		
Molis	— — — — —				
Smėlio, žvirgždo, gargždo mišinys				— — — — —	
Smėlio, žvirgždo, gargždo ir molio mišinys			— — — — —	— — — — —	
Žvirgždas-gargždas (išplautas)				— — — — —	— — — — —
Supilti gruntai		— — — — —			
Argilitas		— — — — —	— — — — —	— — — — —	
Konglomeratai			— — — — —		
Smiltainis		— — — — —			
Klintys			— — — — —	— — — — —	— — — — —
Dolomitas				— — — — —	— — — — —
Mergelis	— — — — —				
Anhidritas					iki 10 ⁷
Gipsas			— — — — —		

— pilno prisotinimo vandeniu zonoje; - - - nepilnai prisotintos

Pirmieji du etapai sėkmingai realizuojami naudojant tam tikslui kompiuterinę inversijos programą RES2DINV (Loke, 1995; 1996; 1997). Sukuriamas tariamųjų varžų pjūvis bei geriausiai jį atitinkantis geoelektrinis modelis (3 pav., B), kuriame atsispindi tikrųjų savitųjų elektrinių varžų ρ erdvinis pasiskirstymas, t. y. gaunamas pjūvis:

$$\rho = F(X, H); \quad (3)$$

čia X – atstumas nuo profilio pradžios, H – gylis nuo žemės paviršiaus.

Perėjimui nuo tariamųjų prie tikrųjų varžų pjūvio naujausioje Res2Dinv varžų inversijos programos 4.1 versijoje (Loke, 2000) taikomas mažiausių kvadratų metodas (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1992), patobulintas naudojant kvaziniutoninę optimizaciją (Loke and Barker, 1996). Šis patobulinimas leidžia sumažinti skaičiavimams naudojamą kompiuterio atmintį ir daugiau nei 10 kartų padidinti skaičiavimų greitį. Skaičiuojamo geoelektrinio modelio atitikimo faktiniams duomenims įvertinamas mažiausiu kvadratinu nuokrypiu (angliškai RMS), kurį programa automatiškai mažina po kiekvienos iteracijos (po kiekvieno modelio apskaičiavimo), tad inversijos kompiuterinis laikas priklauso arba nuo parinkto iteracijų skaičiaus, arba nuo RMS

dydžio. Be to, programoje numatyta daugybė galimybių keisti įvairius inversijos parametrus, kad būtų gautas kuo realesnis, labiau atitinkantis tikrovę geoelektrinis modelis. Bet kokių atveju tariamųjų varžų ir pseudogylių perskaičiavimas į tikrąsias varžas ir gylis matematiniu požiūriu yra nekorektiškas uždavinys (Telford 1980; Ždanov, 1986), o jo sprendimas nevienareikšmis, todėl inversijos parametru tinkamas parinkimas labai priklauso nuo interpretatoriaus kvalifikacijos bei konkrečios geologinės situacijos suvokimo.

Kitas bene sudėtingiausias geologinės interpretacijos etapas – realaus geologinio pjūvio atitikmens gautam geoelektriniui pjūviui suradimas, kadangi, kaip jau buvo minėta, visiškai skirtingos geologiniu požiūriu uolienos gali turėti vienodą elektrinę varžą, o po žeme slūgsančio objekto poveikis matuojamiems parametrams yra sudėtinis, t. y. turi įtakos objekto dydis, slūgsavimo gylis ir varža. Pagal tomografijos duomenis vienareikšmiškai nustatyti objekto dydį ir slūgsavimo gylį galima tik žinant to objekto bei jį supančios aplinkos tikrąsias varžas ir atvirkščiai, nustatyti objekto tikrąją varžą galima, jeigu žinoma požemio geometrija. Akivaizdu, kad geologinės interpretacijos sėkmė priklauso nuo turimos papildomos informacijos apie tiriamo rajono bendrą geologinę situaciją bei uolienu elektrines savybes ir tos infor-

macijos patikimumo. Kuo išsamesnės bus šios žinios, tuo tiksliau realią situaciją atspindės geologiniai modeliai, sudaryti pagal elektrinės tomografijos duomenis.

GEOELEKTRINIS MODELIAVIMAS

Pastaraisiais dešimtmečiais, tobulėjant kompiuterinėms technologijoms, atsirado daugybė programų, su kuriomis galima greitai ir patikimai išspręsti tiesioginį bei atvirkštinį įvairių geofizinės žvalgybos metodų uždavinį. Sprendžiant tiesioginį uždavinį sudaromas tiriamo objekto fizinis geologinis modelis (FGM), kurio atitikimas tikrovę priklauso nuo preliminaros informacijos kiekio. FGM sudaromi pirmojoje tyrimų fazėje, t. y. darbų projektavimo metu, ir tobulinami iki galutinio FGM varianto, pateikiamo ataskaitoje. Patirtis rodo, kad FGM panaudojimas dažnai padeda nuosekliau planuoti vykdomus tyrimus, gauti patikimesnį galutinį rezultatą.

Fizinis geologinis modelis – tai apibendrintas ir formalizuotas geologinės struktūros bei geofizinių laukų atvaizdas erdvėje ir laike, kuris su tam tikru patikimumu atspindi realų tyrimo objektą (Ogilvi, 1990). Šiuolaikinėmis kompiuterinėmis programomis sukurtas FGM gali būti naudojamas ir tiesioginio, ir atvirkštinio geofizinės žvalgybos uždavinio sprendimui, tam tikslui pasitelkus įvairias inversijos procedūras. Surinkus pakankamą tiek geologinės, tiek geofizinės informacijos kiekį, dažnai abu uždaviniai modeliavimo metu sprendžiami kartu.

Išsprendus tiesioginį elektrinės tomografijos uždavinį, surandama, kaip pasiskirstys elektros laukas ir kokie bus jo parametrai atliekant tyrimus skirtingų konfiguracijų elektrožvalgybinėmis linijomis virš modelio, kuriame parinkta ribų, skiriančių objektus su skirtingomis savitosiomis elektrinėmis varžomis, erdvinė padėtis (geometrija). Naudojant 2D ir 3D modeliavimo programas, toks uždavinys gali būti sprendžiamas arba plokštumoje (dvimatė sistema), arba trimatėje sistemoje. Šiuo metu kuriamos keturių matavimų programų versijos, kuriomis bus galima įvertinti modelio ir elektrinio lauko parametrų pokytį laike (Loke, 1997; 1999). Šiame straipsnyje apžvelgiami dvimačio (2D) modeliavimo rezultatai.

Tiesioginio uždavinio sprendimas leidžia parinkti optimalią tyrimų metodiką, įvertinti realias metodo galimybes konkretaus objekto tyrimams ir numatyti laukiamą rezultatą. Tai ir yra svarbiausia programos RES2DMOD paskirtis, tačiau interpretuojant realius ET duomenis tiesioginis uždavinys sprendžiamas tam, kad būtų surastos tariamųjų varžų, išmatuotų virš geoelektrinio modelio (GEM), reikšmės, atlikta jų inversija ir palygintos su realiais tyrimų rezultatais. Ši procedūra padeda suvokti, kaip patobulinti GEM.

Modeliuojant plokštumoje įsivaizduojama, kad tyrimai atliekami skersai begalinio dvimačio objekto

plokštumoje X–Z, kurio nei geometrija, nei elektrinės savybės nekinta Y kryptimi. Nors toks modelis su reikšmingomis išimtimis neatitinka tikrovės, tačiau šiuo metu vyraujant 2D tyrimų metodikai – tai vienintelis modeliavimo būdas. Modeliuojant šiuo būdu geoelektrinis pjūvis profilio plokštumoje suskaidomas į stačiakampius blokus, kuriems priskiriamos atitinkamos savitųjų varžų reikšmės. Toliau pateikiama keletas teorinių ir realių modeliavimo pavyzdžių naudojant RESDMOD programą. Visi modeliai pavyzdžiuose sudaryti atsižvelgiant į realiuose tyrimuose naudotą įrangą ir metodiką, t. y. Venerio arba Šliumberže linijas, kuriose 50 elektrodų įžeminti kas 10 metrų.

Ketvirtame ir penktame paveikslėlyje pavaizduoti dviejų GEM, sąlyginai pavadintų Duobė-1 ir Duobė-2, modeliavimo rezultatai. Abu modeliai yra trijų sluoksnių: pirmojo, 5 m storio, varža – 100 Omm, antrojo varža – 50 Omm, o storis kinta nuo 10 m didesnėje pjūvio dalyje iki 35 m vidurinėje (80 m pločio) profilio dalyje; trečiojo sluoksnio storis nepibrėžtas. Tai tipinis trijų horizontaliai slūgsančių sluoksnių pjūvis, kuriam sukurta klasikinė vertikalaus elektrinio zondavimo teorija (Ždanov, 1986).

Antrajame modelyje įduba profilio viduryje užpildyta žemos varžos (10 Omm) užpildu. Pirmasis modelis kelia aliuzijas į geologinį pjūvį, kuriame po smėliu ar priemėliu slūgso moreninis priemolis, o jį grindžia aukštesnės varžos sluoksnis, kuris geologine prasme gali būti stambiagrūdis, vandens pripildytas smėlis arba plyšiuotos, išdūlėjusios karbonatinės uolienos. Tokie pjūviai su apytikrėmis varžomis būdingi įvairioms Lietuvos vietovėms. Antrasis modelis tipišką karsto rajonui, kur senosios karstinės įdubos užpildytos žemos varžos molinga medžiaga.

Ketvirto ir penkto paveikslėlio viršutinėje dalyje (A) pavaizduoti pradiniai GEM, kurių duomenys buvo panaudoti tolimesniam modeliavimui. Su RES2DMOD programa turint pradinį GEM galima surasti tariamųjų varžų reikšmes, kurios būtų gautos, jei elektrinė tomografija būtų atlikta virš tokio dvimačio pjūvio. Programoje numatyta, kad galima pasirinkti pageidaujamą elektrožvalgybinę liniją, pvz., Venerio, Šliumberže, polis-dipolis, dipolis-dipolis ir t. t.

Jeigu modeliavimas atliekamas interpretuojant konkrečią lauko medžiagą, tai pasirenkama tokia konfiguracija, kuri buvo naudota lauko darbų metu. Tariamosios varžos – tai ta informacija, kuri gaunama lauko tyrimais, ir jos gali būti naudojamos kaip išieities duomenys inversijos programai Res2Dinv. Po inversijos geoelektrinis pjūvis atrodo taip, kaip pavaizduotas 4 ir 5 paveikslėlio vidurinėje dalyje (B). Tokie pat pjūviai gaunami apdorojus eksperimentinius lauko duomenis. Tai yra modeliavimo rezultatas, kurį galima korektiškai lyginti su eksperimento medžiaga. Jei abu pjūviai sutampa, tai reiškia, kad sukurtas GEM atitinka realią situaciją, t. y. geologi-

nis pjūvis yra būtent toks, kaip ir pradiniame modelyje. Iš tikrųjų beveik neįmanoma sukurti tokį GEM, kuris visiškai atitiktų realią lauko medžiagą. Net ir šiuo visiškai idealiu atveju akivaizdu, kad pradinis ir invertuotas modelis skiriasi. B modeliuose apatinė įdubos riba gali būti vedama nevienodai: 4 pav., B ji yra sekiau, o 5 pav., B – giliau nei 40 m. Taip atsitinka todėl, kad pagrindinis parametras, kuriuo operuoja visos inversijos programos, yra išilginis elektrinis laidumas S , t. y. sluoksnio storio H ir jo varžos R sandauga ($S = H \cdot R$). Visi trijų sluoksnių pjūviai, kurių pirmojo ir trečiojo sluoksnio parametrai sutampa, o antrojo sluoksnio S lygūs, yra ekvivalentiški ir tariamosios varžos, gaunamos virš tokių GEM, bus visiškai vienodos. Tai didžiausia visų varžų metodų yda, todėl priimant tokius požeminės struktūros atvaizdus „už gryną pinigą“ galima stipriai apsiriki. Vienareikšmiškai galima pasitikėti geofizinės interpretacijos rezultatu, jei tiksliai yra žinomas bent vienas antrojo, dažnai vadinamo tarpiniu, sluoksnio parametras: arba storis H , arba varža R . Interpretuojant VEZ'ų grafikus inversijos programose numatyta procedūra, leidžianti įvesti apriorinę informaciją (fiksuotas H arba R reikšmės). ET duomenų interpretacijos programose kol kas tokios procedūros nėra, ją numatoma sukurti ateityje, todėl galutinis interpretacijos produktas labai priklauso nuo interpretatoriaus „geologinės nuovokos“. Taigi akivaizdu, kad gautą po inversijos modelį dažnai reikia taisyti (redaguoti). Kad ši procedūra būtų lengvesnė, programoje RES2DMOD numatyta galimybė pavaizduoti modelį ne izoomomis, kaip kad 1 pav. ir 2 pav. B dalyje, bet modelio blokais, turinčiais skirtingas varžas (abiejų paveikslų C dalis). Taip supaprastėja redagavimas, kadangi galima keisti atskirų blokų varžas ir išgauti kuo geresnį teorinio ir faktinio modelio sutapimą.

Kita vertus, kaip jau buvo minėta, modeliavimas naudingas parenkant kuo efektyviausią tyrimams elektrožvalgybinę liniją, kadangi toje pačioje geoelektrinėje situacijoje tariamųjų varžų reikšmės, gautos skirtingomis linijomis, invertuojamos skirtingai. Penktame paveikslėlyje pavaizduoti tariamųjų varžų, užregistruotų virš modelio Duobė-2 Venerio, Šliumberže ir dipolis-dipolis linijomis, inversijos rezultatai. Jame akivaizdžiai matyti, kad GEM, gauti pagal matavimų Venerio ir dipolis-dipolis linijomis rezultatus, yra labai artimi pradiniam modeliui, tuo tarpu geoelektriniame modelyje, matavimų Šliumberže linija duomenimis, apatinė įdubos riba yra neapibrėžta. Visiškai aišku, kad tokioje geoelektrinėje situacijoje naudoti tyrimams Šliumberže liniją neracionalu.

Kitas teorinis modelis, sąlyginai pavadintas Lūžiu, pavaizduotas 6 paveikslėlyje. Modeliai, sudaryti pagal tariamųjų varžų, užregistruotų skirtingomis linijomis, inversijos rezultatus yra praktiškai lygiaver-

čiai – galbūt tik C modelyje (Šliumberže linija) mažiau „triuksmų“. Tokiu atveju, parenkant tyrimų metodiką, reikia atsižvelgti į tyrimų gylį, ekonominius rodiklius ir t. t.

Anksčiau pateikti teorinių pjūvių modeliavimo pavyzdžiai akivaizdžiai parodo, kad net ir pakankamai nesudėtingoje geoelektrinėje situacijoje be papildomos informacijos interpretacijos rezultatai gali gerokai skirtis nuo realaus pjūvio. Ypač tai pasakytina tuo atveju, kai tiriamų požeminių objektų dydis išilgai profilio linijos yra gerokai mažesnis nei naudojamos elektrožvalgybinės linijos ilgis. Pačiu bendriausiu atveju geologinių sluoksnių ribas geoelektriniuose modeliuose, gautuose pagal elektrinės tomografijos duomenis ir naudojant inversijos programą Res2Dinv, reikia vesti per didžiausio varžų gradiento zonas, kur varžų pokyčiai didžiausi.

Toliau pateikiama keletas ET realių duomenų interpretacijos pavyzdžių pasitelkiant tam tikslui modeliavimą. Septintame paveikslėlyje pavaizduotas modelis, kuris sudarytas pagal tariamąsias varžas, gautas profilyje prie Vainekonių kaimo (Pasvalio r.).

Preliminariais duomenimis, geologinis pjūvis šioje vietovėje sudarytas iš molingų kvartero nuogulų, kurias grindžia viršutinio devono Pamūšio svitos sluoksnuota molinga mergelio-molio storumė arba iškart po kvartero nuogulomis slūgso Tatulos svitos dolomitas su gipso tarp sluoksniais.

Geoelektrinio pjūvio viršuje gerai matyti ištisinis 5 m storio sluoksnis, kurio varžos yra 17–22 Omm intervale. Po juo išskiriamas maždaug tokio pat storio antras horizontalus sluoksnis, kurio varža – 26–45 Omm. Einant gilyn varžos modelyje didėja nuo 51–67 Omm viršutinėje dalyje iki 134 Omm apatinėje. Šioje profilio dalyje kvartero skyriaus specialistų užsakymu išgręžtas 11,2 m gylio gręžinys Nr. 16529. Juo buvo pragręžtas 5 m storio molio sluoksnis, po kuriuo aptiktas plonas 0,5 m smėlio tarp sluoksnis, giliau, iki 11 m gylio, slūgso priesmėlis. Vienuolikos metrų gylyje gręžimo instrumentas atsirėmė į kietų uolienų paviršių. Šioje profilio dalyje gręžimo ir ET duomenys puikiai sutampa, ir tai yra pjūvyje, kuriame varžų kontrastas visai nedidelis. Galbūt neturint gręžimo duomenų šiek tiek sudėtingiau būtų praveisti priesmėlio ribą, tačiau ir šiuo atveju paklaida nebūtų didesnė kaip 1–2 m. Taigi visiškai pagrįstai galima teigti, kad šiaurinėje dalyje nuo profilio pradžios iki 275-ojo profilio metro po 10–11 m storio kvartero nuogulomis slūgso Tatulos svitos dolomitas.

Vaizdas pasikeičia perėjus iš šiaurinės profilio dalies į pietinę. Geoelektrinio modelio vidurinėje dalyje akivaizdžiai matosi fleksūros tipo struktūra. Čia aukštos varžos sluoksnio kraigas staigiai grimzta nuo 11 m į daugiau nei 40 m gylį. Be to, į pietus nuo 330-ojo profilio metro 20–45 m gylyje yra žemų var-

žų (26–39 Omm) blokas. Gręžinių šiame profilio gale nėra, tačiau bendrai samprotaujant apie rajono geologiją galima daryti prielaidą, kad čia po kvartero dariniaus slūgso Pamūšio svitos molingos nuogulos. Schematizuotos geologinės ribos pjūvyje praveistos punktyrinėmis linijomis (7 pav., B). Išsamesnis pagal ET duomenis aptiktos požeminės struktūros tyrimas parodė, kad ji puikiai koreliuojasi su giluminiu lūžiu, apribojančiu Vaškų struktūros pietinę dalį (Michelevicius, Seckus, 1999). Taigi pateiktas pavyzdys rodo, kad nesudėtingoje, nors geologiniu požiūriu ir įdomioje geoelektrinėje situacijoje, esant minimaliam papildomos informacijos kiekiui, ET duomenų interpretacija nekelia didesnių problemų.

Šiek tiek sudėtingesnė požeminė situacija atsispindi profilyje Dvargaliai 1–4 (8 pav., A). Tyrimai išilgai profilio buvo atlikti vykdant kartografavimo darbus Tetervinų plote (Jacyna ir kt., 2000). Profilio pradžioje ir gale esančių gręžinių (atitinkamai Nr. 20892 ir Nr. 11974) duomenys buvo panaudoti geoelektrinio modelio geologinei interpretacijai. Profilio vakariniame gale išgręžto gręžinio Nr. 20892 pjūvyje išskirtos kvartero, Pamūšio ir Įstro-Tatulos svitų nuogulos. Kvartero priemolio padas slūgso 23, o Pamūšio mergelio – 28 m gylyje. Rytiniame gale, gręžinyje Nr. 11974, po 12 m storio kvartero priemoliu aptiktas pilkas dolomitas, kurio amžius apibūdintas kaip D₃. Taigi profilio linijoje einant iš vakarų į rytus kvartero storis mažėja nuo 23 iki 12 m, o Pamūšio svitos nuogulos išsipleišėja. Akivaizdu, kad svarbiausias ET duomenų interpretacijos uždavinys – pasekti geologinio pjūvio kaitą išilgai profilio linijos ir nustatyti geologinių ribų padėtį pjūvyje.

Geoelektriniai modeliai vakarinei ir rytinei profilio daliai (8 pav., C) buvo sudaryti RES2DMOD modeliavimo programa pagal gręžimo ir ET lauko darbų duomenis. Varžų reikšmės atitinkamiems sluoksniams buvo parenkamos taip, kad vakarinės ir rytinės profilio dalies geoelektriniai pjūviai (8 pav., A ir B) būtų maksimaliai panašūs. Taip parinkus nustatyta, kad kvartero nuogulų varžos yra 60 Omm, Pamūšio – 25 Omm, o dolomito – 100 Omm vakarinėje profilio dalyje ir 250 Omm rytinėje. Po šių procedūrų galima atlikti geoelektrinio pjūvio, gauto pagal ET duomenis, geologinę interpretaciją (ją pateikiame toliau).

Geoelektrinio modelio didesnėje dalyje po kvartero priemoliu slūgso Pamūšio mergelis, kuris dengia Įstro-Tatulos vandeningą dolomitą su molio ir gipso sluoksniais. Mergelio storis kinta nuo 8 iki 22 m. Mažiausi storiai fiksuojami centrinėje profilio dalyje; čia D_{3_{ys-t}} paviršius ryškiai pakeltas. Rytiniame profilio gale po 6–7 m storio priemoliu slūgso aukštos varžos uoliena, kurią, matyt, reikėtų interpretuoti kaip dolomitą su gipso tarpais, tuo tarpu Pamūšio mergelio šioje profilio dalyje nėra. Mergelio išsipleišėjimo riba yra apie 1470 m nuo profilio pradžios.

Su daug sudėtingesniu atveju buvo susidurta interpretuojant ET duomenis Kauno miesto Kleboniškių vandenvietėje. Prieš pradėdant tyrimus buvo pateiktas vandenvietės geologinis-hidrogeologinis pjūvis, sudarytas pagal gręžimo duomenis (Šeirys, 1985). Schematiškai pjūvis gana paprastas: 20–30 m storio žvyro ir smėlio nuogulas grindžia moreninis priemolis. Šiaurinėje vandenvietės dalyje moreninio priemolio kraigas grimzta iki 40 m (?) gylio. Gruntinis vanduo vandenvietėje yra 10 m gylyje. Vadovaujantis šiais duomenimis, buvo sudarytas vandenvietės pradinis GEM (9 pav., A). Geoelektrinių sluoksnių storiai parinkti pagal gręžimo duomenis, o jų elektrinės varžos apskaičiuotos pagal Arči formulę (Ogilvi, 1990) naudojant tam tikslui realias nuogulų poringumo ir vandens mineralizacijos reikšmes. Buvo sudarytas 4 sluoksnių GEM, kuriame pirmojo vieno metro storio sluoksnio varža yra 5000 Omm, antrojo 9 m storio – 1000 Omm, trečiojo 10–30 m storio – 300 Omm ir ketvirtojo begalinio storio – 100 Omm. Hidrogeologine prasme pirmas ir antras sluoksnis sudaro aeracijos zoną, trečiame – vandeniui prisotintas žvyras ir smėlis ir ketvirtame – moreninis kompaktiškas priemolis. RES2DMOD programa buvo suskaičiuotos tariamosios varžos, kurios turėtų būti virš tokio pjūvio dirbant Venerio linija, o Res2Dinv programa atlikta tariamųjų varžų inversija ir sudarytas geoelektrinis pjūvis (9 pav., B).

Palyginus gautą rezultatą su geoelektriniu pjūviu (10 pav., A), sudarytu Res2Dinv programa pagal ET lauko tyrimų duomenis išilgai profilio Kleboniškių-1 naudojant Venerio liniją, matyti, kad jie akivaizdžiai neatitinka. Realiame pjūvyje varžų pokyčio intervalas yra nuo 5 iki 1280 Omm, tuo tarpu teoriniame nėra varžų, žemesnių nei 90 Omm, o ir požeminė struktūra visiškai kitokia. Tai akivaizdžiai rodo, kad pirminis GEM neatitinka tikrovės. Labai žemos, visiškai nebūdingos gėlu vandeniui prisotintoms uolienoms varžų reikšmės vertė galvoti, kad realiems ET rezultatams daro įtaką ne gamtinės kilmės veiksniai, t. y. gręžiniai ir inžinerinės komunikacijos, ypač metaliniai vamzdiniai, todėl pirminį GEM reikia koreguoti. Taigi pirminis modelis buvo papildytas informacija apie eksploatacinius gręžinius ir šulinius, esančius virš kiekvieno gręžinio žiočių. Buvo pasirinkta 0,1 Omm metalinių vamzdžių varža (mažesnių reikšmių neleidžia pasirinkti modeliavimo programa), o šulinių – 5000 Omm (10 pav., B) ir vėl suskaičiuotos modelį atitinkančios tariamosios varžos, Res2Dinv programa sudarytas naujas geoelektrinis pjūvis (10 pav., C). Po tokios pradinio modelio korekcijos teorinis (10 pav., C) ir realus (10 pav., A) geoelektrinis pjūvis supanašėjo: teoriniame atsirado tos pačios eilės žemos varžos. Pjūvių pietinės pusės požeminė struktūra iki 140-ojo profilio metro turi daug bendrų bruožų, tačiau pjūvių šiaurinės dalys visiškai

skirtingos. Ypač jos skiriasi profilio atkarpoje nuo 160 iki 290 m: čia realiam pjūvyje matoma itin žemų varžų anomalija 12–14 m gylyje, tuo tarpu teoriniame jų nėra. Matyt, čia po žeme yra papildomų metalinių objektų, tuo labiau kad tarp 270–290-ojo profilio metro yra vandenvietės siurblinės pastatas. Nesant papildomos informacijos pradinis GEM išilgai šio profilio nebuvo tobulinamas. Tai nėra pagrindinis šio darbo tikslas, tačiau akivaizdu, kad sudėtingoje inžinerinėje situacijoje, kai po žeme yra metalinių objektų ar kitokių požeminių komunikacijų (šiluminės trasos, rūsiai ir pan.), galinčių iškraipyti elektros lauką, ET duomenų interpretacija darosi labai sudėtinga. Šiuo atveju GEM turi būti sudaromas labai kruopščiai, tačiau ir tai negarantuoja galutinio teigiamo geologinio rezultato.

IŠVADOS

Patirtis, sukaupta per penkerius metus atliekant elektrinę tomografiją Lietuvoje, leidžia apibendrinti ir suformuluoti atitinkamas išvadas bei rekomendacijas, kokioje geologinėje situacijoje ET taikytina, kaip parinkti efektyviausias tyrimų ir interpretacijos metodikas atsižvelgiant į konkrečią geologinę situaciją.

1. Elektrinės tomografijos metodas šiuo metu yra tobuliausias geofizinis pastovios srovės tyrimų metodas. Jis ne tik visiškai pakeičia VEZ ir elektrinio profiliavimo metodus, jo rezultatai daug patikimesni darbų projektavimui ir gautų duomenų interpretacijai naudojant modeliavimą. Šiuo metu Lietuvoje esanti 50 elektrodų sistema leidžia atlikti tyrimus išilgai 500 m ilgio profilio. Šiuo atveju tyrimų gylis – iki 70–80 m. Norint gauti išsamesnį pjūvio vaizdą mažinamas profilio ilgis, tačiau tuomet mažėja ir tyrimų gylis. Pjūvyje patikimai išskiriami objektai, kurių storis viršija 1/2 slūgsojimo gylio, o ilgis yra mažesnis kaip 1/3 elektrožvalgybinės linijos ilgio.

2. Geoelektriniuose modeliuose požeminės sandaros geometriją atspindi skirtingų varžų sluoksniai ar kitokios formos objektai. Ribos tarp objektų vedamos per didžiausio varžų gradiento zonas. Kuo didesnis varžų kontrastas, tuo jos ryškesnės. Patikimos ribos tarp objektų, kurių varžų skirtumas didesnis nei 30–50 Omm.

3. Siekiant racionaliai organizuoti ir vykdyti tyrimus, bet kuriam tyrimų objektui turi būti sudarytas geoelektrinis modelis (GEM). Pradinis GEM sudaromas vadovaujantis apriorine informacija (jei tokia yra) bei bendra samprata apie tiriamos vietovės geologines, hidrogeologines ir geoelektrines sąlygas. Turint pradinį GEM ir naudojant ET modeliavimo programas parenkama racionaliausia tyrimų metodika (elektrožvalgybinės linijos tipas, profilių ilgiai ir kryptys), įvertinama, kokia naudinga geologinio uždavinio sprendimui informacija bus gauta atlikus ET.

Darbo metu, gavus naujų faktinių duomenų, GEM nuolat tobulinamas, todėl gali būti keičiama tyrimų metodika.

4. ET duomenų patikima geofizinė ir geologinė interpretacija, kaip ir bet kurio kito geofizinių tyrimų metodo, neįmanoma be papildomos geofizinės-geologinės informacijos. Papildoma informacija gali būti apriorinė (iš fondų) arba gaunama darbų metu. Lietuvoje šiuo metu, nesant elektrinės žvalgybos ir gręžinių geofizinių tyrimų duomenų bankų, bene vienintelis apriorinės informacijos šaltinis yra gręžimo duomenys. Dirbant gaunama „nepriklausoma“ informacija ir yra elektrinės tomografijos bei gręžimo duomenys, kai gręžiniai išdėstomi atsižvelgiant į jau atliktų geofizinių tyrimų rezultatus. Taigi darbų eiliškumas turėtų būti toks: pirma – ET, po to – gręžimas, o ne atvirkščiai, kaip dažniausiai (su retomis išimtimis) būna šiuo metu.

5. Metodas pasiteisino tiek kvartero, tiek ir prekvartero nuogulų tyrimuose. Ypač gerai išskiriamos geologinės ribos tarp smėlio-žvirgždo ir moreninio priemolio-molio, tarp molingų kvartero darinių ir karbonatinių prekvartero uolienų (klinčių, dolomito) ir pan. Palankioje geoelektrinėje situacijoje (smėlišvyras-gargždas) naudojant ET galima nustatyti grunto vandens slūgsojimo gylį. Metodas perspektyvus sąvartynų, šiukšlynų, buvusių karinių bazių požeminės sandaros tyrimams. Galima nustatyti taršos nuotėkį, jei jis sukelia apčiuopiamus (didesnius nei 0,5 g/l) požeminio vandens mineralizacijos pokyčius. ET Šiaurės Lietuvos karsto rajone parodė, kad metodas daug pranašesnis už visus kitus anksčiau naudotus (VEZ, EP, seisminius) geofizinius metodus.

6. ET taikymas hidrogeologinių, geoekologinių ar inžinerinių tyrimų komplekse itin efektyvus, nes atsižvelgiant į požeminės sandaros, matomos geoelektriniuose pjūviuose, ypatumus galima sėkmingai parinkti geriausias vietas gręžiniams ir pagrįstai interpoliuoti gręžimo metu gautą informaciją tarp gręžinių. Dažniausiai šiems tyrimams būtinas didelis duomenų tankis, todėl elektrinės tomografijos taikymas gali gerokai sumažinti gręžinių skaičių neprarandant, o dažnai gaunant dar didesnę informacijos kiekį, o tai atpigina tyrimą.

Literatūra

- deGroot-Hedlin C. and Constable S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*. **55**. 1613–1624.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*. **40**. 453–464.
- Loke M. H. and Barker R. D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*. **44**. 131–152.
- Telford V. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Keys D. A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press;

Prikladnaja geofizika. Moskva: Nedra, 1980 (vertimas į rusų k.). P. 502.

Ždanov M. S. 1986. Elektrorazvedka. Moskva: Nedra. P. 315.

Ogilvy A. A. 1990. Osnovy inženernoj geofiziki. Moskva: Nedra. P. 501.

Michelevicius D., Seckus R. Fault Zones Tracing Using Resistivity and Seismic Data. 61st Conference of European Association of Geoscientists & Engineers, Extended Abstracts, Helsinki, Finland, June 1999. P095.

Jacyna J., Lokutijevskis V., Nasedkin V., Michelevičius D., Šečkus R. 2000. Geofiziniai tyrimai Tėtėrinų plote. Lietuvos geologijos tarnybos 1999 metų veiklos rezultatai. Lietuvos geologijos tarnyba. 21–22.

Rimantas Šečkus

THE MAIN PRINCIPLES OF THE USE OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY FOR GEOLOGICAL PURPOSES

S u m m a r y

Electrical tomography (ET), a new method of surface geophysical survey, is a technology that contains two well-known methods – vertical electrical sounding and electrical profiling. Since 1996 the method has been tested on different sites of Lithuania for solving various geological, hydrogeological, engineering geological, geoeological and even archeological tasks. The CAMPUS Resistivity Imaging System with multielectrode cables was used for field measurements, and a two-dimensional inversion of acquired values of apparent resistivity was made by Res2Dinv software. The principal ability to apply ET for investigating the subsurface is grounded on changes of electrical resistivity of rocks. The final product after inversion is a 2D geoelectrical model where objects with different resistivity are shown. It is well known that inversion process does not have a unique and stable mathematical solution. On the other hand, rocks very different from the geological point of view could have the same resistivity. Therefore the most important step in ET investigation is final geological interpretation. During this stage electrical objects are identified as geological bodies determining their position in the subsurface.

The computer modeling software RES2DMOD of ET data with an input of drilling data was used to facilitate the solution of the problem. The models obtained during the process of modeling were compared with experimental fieldwork data, trying to achieve the best agreement between them. A very good agreement has been achieved in most cases of a simple geological situation, but in areas with complicated geoelectrical conditions the result of the modeling was not so successful.

Totally, application of ET in geological, hydrogeological, engineering geological and geoeological investigations has shown a very high effectiveness of the method, because the best places for sitting of new drill holes could be chosen, and a well-grounded interpolation between the neighboring drill holes can be made. The number of drill holes could be reduced without loss of information, especially in not very complicated geological situations, with reducing the cost of investigation.

Римантас Шечкус

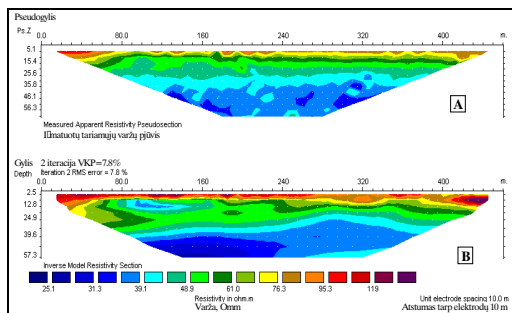
ВАЖНЕЙШИЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Р е з ю м е

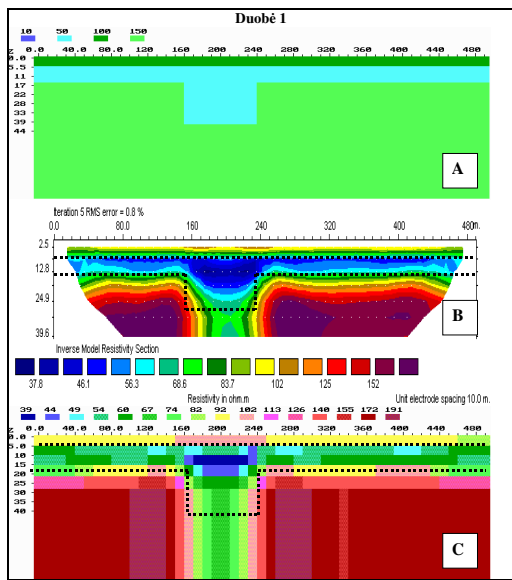
Новый метод наземной геофизической разведки – электрическая томография (ЭТ) – это технология, включающая в себя два хорошо известных метода: вертикальное электрическое зондирование и электрическое профилирование. С 1996 года метод применялся в Литве на многих объектах для решения различных геологических, гидрогеологических, геоэкологических и даже археологических задач. Полевые измерения проводились с помощью аппаратного комплекса *CAMPUS Resistivity Imaging System* при использовании многоэлектродных кабельных установок, а двухмерная инверсия полученных значений кажущихся сопротивлений осуществлялась компьютерной программой *Res2Dinv*. Принципиальная возможность применения ЭТ для исследования подземного пространства основана на различии электрических сопротивлений пород. Результатом проведенной инверсии является двухмерная геоэлектрическая модель, на которой выделяются объекты с различным сопротивлением. Хорошо известно, что инверсия не позволяет получить однозначное решение – эта задача математически некорректна. С другой стороны, совершенно различные в геологическом смысле породы могут иметь одинаковое сопротивление, поэтому очень важным этапом электротомографических исследований является геологическая интерпретация полученных геоэлектрических моделей. На этом этапе электрические объекты идентифицируются как геологические тела с определенным положением в пространстве.

Для того, чтобы облегчить решение проблемы, программой *RES2DMOD* осуществлялось геоэлектрическое моделирование с одновременным введением в модель данных бурения. Полученные таким способом модели сравнивались с моделями, построенными по полевым данным и, в случае необходимости, коррегировались, чтобы получить наилучшее совпадение. При не очень сложной геологической обстановке удаётся получить очень хорошее согласие теоретических и фактических моделей, однако в сложных геоэлектрических условиях достигнуть удовлетворительного результата удаётся не всегда.

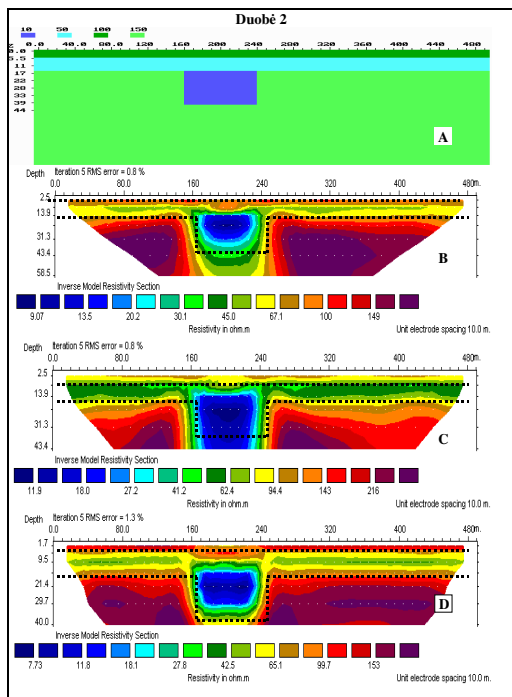
В целом, применение ЭТ в комплексе геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических или геоэкологических исследований показало очень высокую эффективность метода при подборе мест бурения новых скважин и при проведении хорошо обоснованной интерполяции данных бурения в межскважинном пространстве. Кроме того, при несложной геологической обстановке может быть уменьшено количество скважин без потери общего объёма информации, что ведёт к удешевлению исследований.



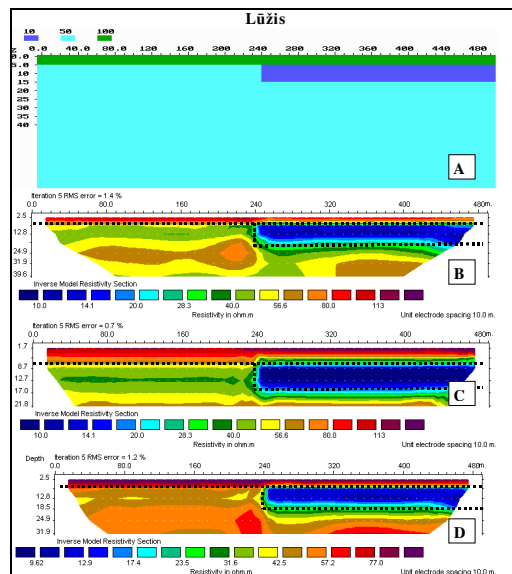
3 pav.



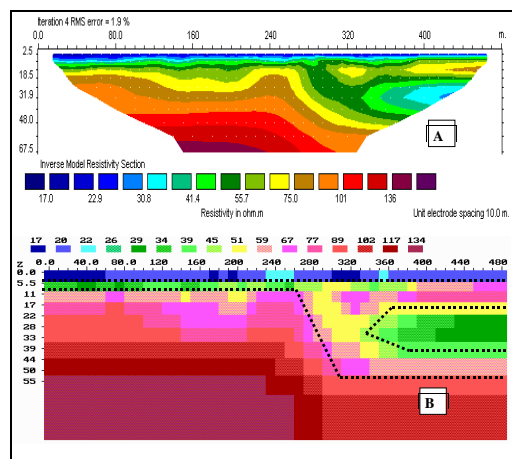
4 pav.



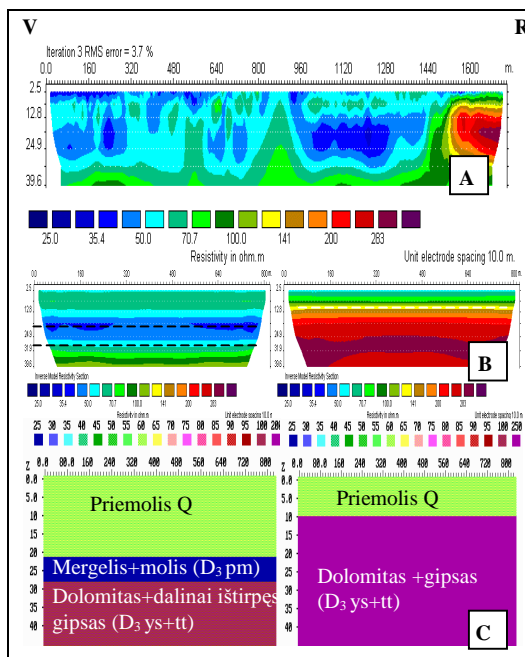
5 pav.



6 pav.



7 pav.



8 pav.

3 pav. Geoelektrinio modelio sudarymo Res2Dinv programa pavyzdys:

A – išmatuotų tariamųjų varžų pjūvis, *B* – apskaičiuotų savitųjų varžų pjūvis (geoelektrinis modelis)

Fig. 3. Example of construction of a geoelectrical model by Res2Dinv software:

A – measured apparent resistivity section (pseudosection), *B* – calculated resistivity section (geoelectrical model)

4 pav. Geoelektrinis modelis Duobė-1: *A* – pradinis modelis (vertikali ašis – gylis nuo žemės paviršiaus, horizontali – atstumas nuo profilio pradžios, varžų skalė – viršuje); *B* – teorinis modelis, sudarytas Res2Dinv programa tam atvejui, jei matavimai virš pradinio modelio būtų atlikti naudojant Venerio liniją (varžų skalė apačioje); *C* – modelis, atitinkantis *B* modelį po apdorojimo Res2Dmod programa (varžų skalė viršuje). Taškais pažymėtos sluoksnių ribos pradiniam modelyje

Fig. 4. Geoelectrical model Duobė-1: *A* – initial model (vertical axis – depth from the surface, horizontal – distance from the beginning of profile, on the top – resistivity scale); *B* – theoretical model constructed by Res2Dinv software if field measurements above the initial model are performed using the Venner array (resistivity scale – on the bottom); *C* – model *B* after processing by RES2DMOD software (resistivity scale – on the top). Boundaries of the initial model layers are marked by dots

5 pav. Teoriniai modeliai Duobė-2, kurie būtų gauti atlikus matavimus virš pradinio modelio skirtingomis linijomis: *A* – pradinis modelis, *B* – Venerio, *C* – Šliumberže, *D* – dipolis-dipolis linija (kiti paaiškinimai 4 pav.)

Fig. 5. Theoretical models Duobė-2, which could be constructed if measurements above the initial model would be acquired by different arrangement of electrodes: *A* – initial model, *B* – Venner array, *C* – Schlumberger, *D* – dipole-dipole array (other array explanations in Fig. 4)

6 pav. Teoriniai geoelektriniai modeliai Lūžis, sudaryti inversijos programa Res2Dinv, kurie būtų gauti, jei tyrimai virš pradinio modelio būtų atlikti skirtingomis linijomis: *A* – pradinis modelis; *B* – Venerio linija; *C* – Šliumberže linija; *D* – dipolis-dipolis linija

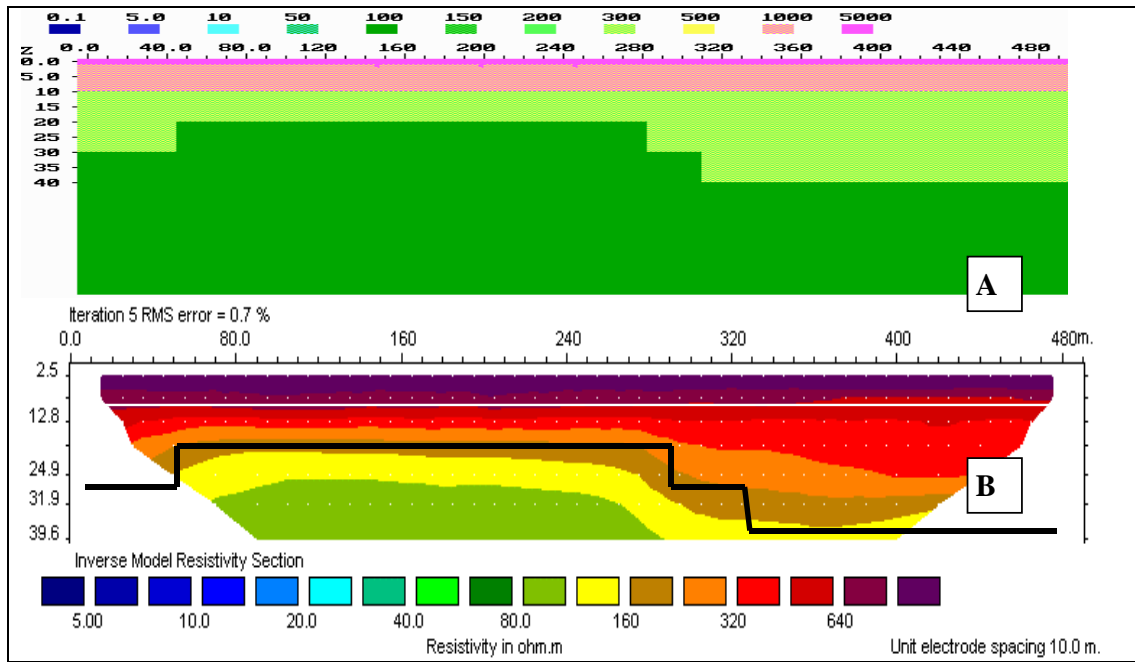
Fig. 6. Theoretical geoelectrical models constructed by Res2Dinv software, if field measurements above of the initial model would be performed using different arrays: *A* – initial model; *B* – Venner array, *C* – Schlumberger array, *D* – dipole-dipole array

7 pav. Profilio Vainekonai-2 geoelektriniai modeliai, sudaryti Res2Dinv (*A*) ir RES2DMOD (*B*) programomis. Taškais pažymėtos geologinių sluoksnių ribos

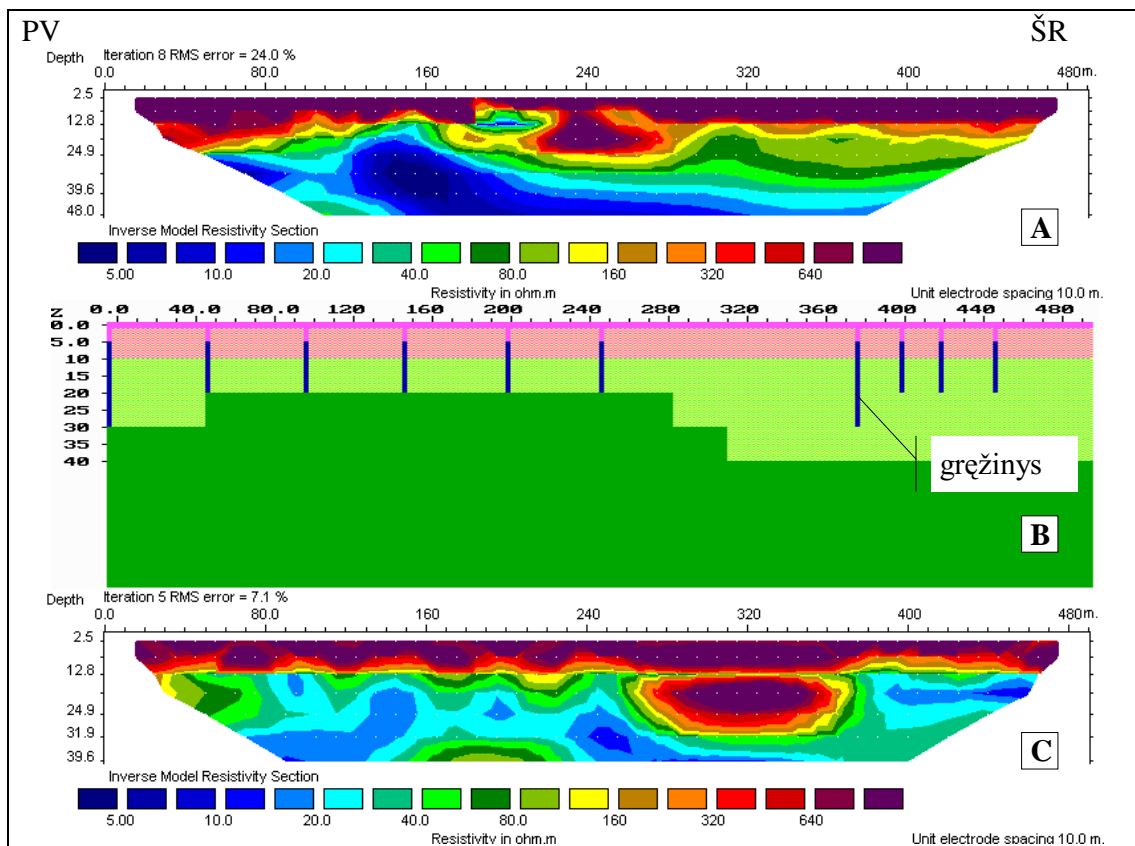
Fig. 7. Geoelectrical models of Vainekonai-2 profile calculated by Res2Dinv (*A*) and RES2DMOD (*B*). Boundaries between geological layers are marked by dots

8 pav. Profilio DVARGALIAI 1–4 geoelektriniai modeliai (spalvotos varžų skalės – prie atitinkamų modelių): *A* – sudarytas Res2Dinv programa pagal faktinius lauko tyrimų duomenis; *B* – modelių, pavaizduotų apatinėje (*C*) piešinio dalyje, atitikmenys, sudaryti Res2Dinv programa; *C* – sudaryti RES3DMOD programa pagal gręžimo duomenis (sluoksnių varžos parinktos pagal modeliavimo rezultatus)

Fig. 8. Geoelectrical models of DVARGALIAI 1–4 profile (colored resistivity scales are near models): *A* – created by Res2Dinv using field data; *B* – created by Res2Dinv and corresponding with models drawn on top part of picture (*C*); *C* – created by RES3DMOD using drilling data (values of resistivity chosen during modeling)



9 pav. Teoriniai modeliai išilgai profilio Kleboniškis-1: *A* – pradinis modelis, sudarytas pagal gręžimo duomenis, *B* – modelis, sudarytas RES2DMOD ir Res2Dinv programomis. Linijomis pažymėtos pradinio modelio sluoksnių ribos
 Fig. 9. Theoretical models along Kleboniškis-1 profile: *A* – initial model created using drilling data; *B* – model created by RES2DMOD and Res2Dinv software. Boundaries between layers of the initial model are marked by lines



10 pav. Profilio Kleboniškis-1 geoelektriniai modeliai. *A* – sukurtas Res2Dinv programa pagal realius matavimo duomenis, *B* – sudarytas pagal gręžimo duomenis RES2DMOD programa, *C* – sukurtas RES2DMOD ir Res2Dinv programomis ir atitinkantis *B* modelį
 Fig. 10. Geoelectrical models along Kleboniškis-1 profile: *A* – created by Res2Dinv using field measurement data, *B* – created by RES2DMOD using drilling data, *C* – created by RES2DMOD and Res2Dinv for model *B*