

Geologinių pjūvių sudėties ir šiluminio laidumo vertės koreliacija

Žygimantas Palaitis¹,

Jonas Satkūnas²

¹ Vilniaus universitetas,
Hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedra,
Čiurlionio g. 21/27, LT-03101 Vilnius
El. paštas patvirtinta@gmail.com

² Vilniaus universitetas,
Ekologijos ir aplinkotyros centras,
Čiurlionio g. 21/27, LT-03101 Vilnius
El. paštas jonas.satkunas@lgt.lt

Palaitis Ž., Stankūnas J. Geologinių pjūvių sudėties ir šiluminio laidumo vertės koreliacija. *Geologija. Geografija*. 2016. T. 2(4). ISSN 2351-7549.

Geologinių pjūvių šiluminis laidumas nustatytas vadovaujantis tarptautiniu ISO 17628:2015 standartu, aprašančiu grunto ir uolienu šiluminio savitojo laidumo įvertinimą geoterminiu gręžiniu. Straipsnyje nagrinėjamos skirtingos sandaros geologinės stromės šiluminio laidumo priklausomybės nuo geologinių pjūvių formuojančių darinių ir bendro stromės storio tendencijos. Pristatoma esama sekliosios geotermijos išteklių naudojimo situacija ir tyrimų svarba. Apžvelgiami laboratoriniai ir lauko tyrimo metodai, jų privalumai ir trūkumai, taip pat geologinių sąlygų panašumo principo taikymas. Stromių šiluminis laidumas įvertintas apdorojus terminės reakcijos tyrimo (TRT) duomenis, taikant tiesinės priklausomybės sprendinius. Atlikus duomenų analizę nustatytos geologinės stromės šiluminio laidumo ir litologinės sudėties tarpusavio priklausomybės funkcijos, kurios gerai koreliuoja su tiriamųjų stromių faktiniais duomenimis.

Raktažodžiai: geoterminis gręžinys, sekloji geotermija, uolienu šiluminis laidumas

ĮVADAS

Lietuvoje vykdant 1992 m. pasirašyto Kioto protokolo įsipareigojimus ir siekiant energetinės nepriklausomybės diversifikuotas energetinių išteklių importas, pasiekta akivaizdi pažanga naudojant atsinaujinančius energijos išteklius (AEI). Lietuvos Respublikos energetikos ministerijos duomenimis, šilumos sektoriuje centralizuotai tiekiamą šilumos energija, pagaminta iš AEI, 2014 m. sudarė 382,454 kt_{ne} (~4448 GWh). Daugiausia – 93,4 % – mediena ir jos atliekos. Geoterminė energija sudarė 0,9 % viso kiekio. Lietuvoje 1996 m. pastatyta vienintelė pavyzdinė Klaipėdos geoterminė jėgainė, naudojanti giliosios geotermijos išteklius. UAB „Geoterma“ duomenimis,

2014 m. jėgainė pagamino 10,8 tūkst. MWh, t. y. 27 % visų geoterminių išteklių kiekio. Likusi dalis, maždaug 29,23 tūkst. MWh, turėtų būti pagaminta geoterminiais šilumos siurbliais, naudojančiais sekliosios geotermijos išteklius. Tokį kiekį šilumos pagamintų 1 170 atskirų 10 kW galios sistemų per metus, dirbdamos 2 500 darbo valandų. Apklausus oficialias didžiųjų užsienio šilumos siurblių gamintojų atstovybes paaiškėjo, kad Lietuvoje kiekvienais metais parduodama nuo 500 iki 700 šilumos siurblių, kurių didžioji dalis yra 9–12 kW galios. Platus geoterminių šilumos siurblių naudojimas kelia susirūpinimą dėl žemės gelmių apsaugos. Lietuvos geologijos tarnyba, siekdama užtikrinti racionalų išteklių naudojimą ir prisidėti prie vietinių AEI panaudojimo šalies ūkyje skatinimo,

2012 m. sudarė požeminio vandens vidutinės daugiametės temperatūros iki 30 m gylio žemėlapius, o 2015 m. parengė geoterminių gręžinių projektavimo, įrengimo ir likvidavimo tvarkos aprašą, kuriame numatė būtinybę atlikti geofizinius tyrimus sklypo geologinei sandarai ir uolienų šilumos laidumui nustatyti didesnėms nei 30 kW nominalios galios geoterminių gręžinių sistemoms. Taip pat pradėjo registruoti esamas ir naujai įrengiamas geoterminių gręžinių sistemas.

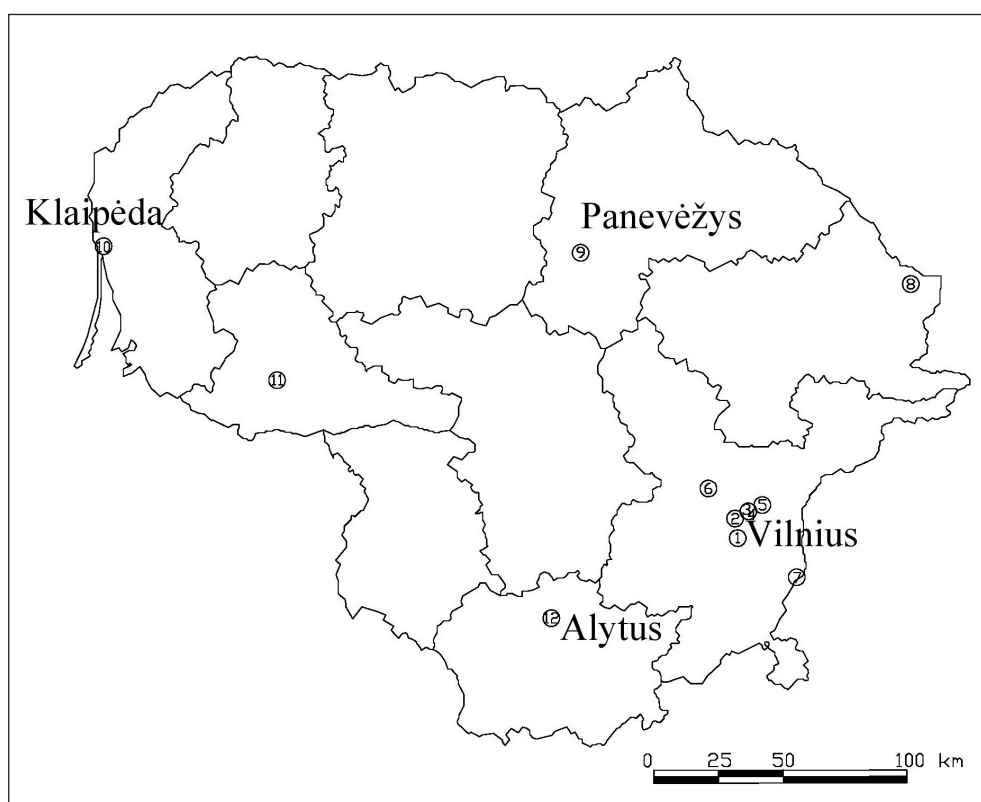
Šiluminis laidumas nusako galimą išgauti geoterminių išteklių kiekį iš tam tikro uolienų tūrio gelmių temperatūrą žeminant iki tam tikro lygio ir patiriamų šiluminės energijos nuostolių dydį kaupimo metu. Europos Komisija yra nustačiusi ekologinius kriterijus geoterminių šilumos siurblių sūrymas / vanduo sistemoms. Žinant apibendrintą uolienų šiluminį laidumą (λ) galima sudaryti gelmių matematinį modelį, laiku prognozuoti geoterminių išteklių gavybos poveikį. Modelinių

skaičiavimų pagrindu įvertinamas geoterminių gręžinių kiekis, užtikrinantis efektyvų geoterminės sistemos darbą. Žinant geoterminių išteklių kiekį ir formavimosi ypatumus Lietuvoje, bus galima užtikrinti racionalų seklosios geoterminės išteklių naudojimą, todėl šio tipo tyrimai yra ypač aktualūs.

Darbo tikslas – nustatyti įvairaus gylio geoterminių gręžinių, įrengtų skirtingos sudėties geologinėse stovymėse, šiluminį laidumą ir pamėginti rasti jo priklausomybes nuo stovymės sandarą aprašančių funkcijų, kas suteiktų galimybę prognozuoti stovymės šiluminės charakteristikas.

TYRIMŲ MEDŽIAGA

Tyrimų objektas – geoterminiai gręžiniai, įrengti įvairiose Lietuvos teritorijos vietose, skirtingos litologinės sudėties stovymėse. Tyrimų metu buvo įrengta 12 geoterminių gręžinių (1, 2 pav.).



1 pav. Tirtųjų vietų žemėlapis

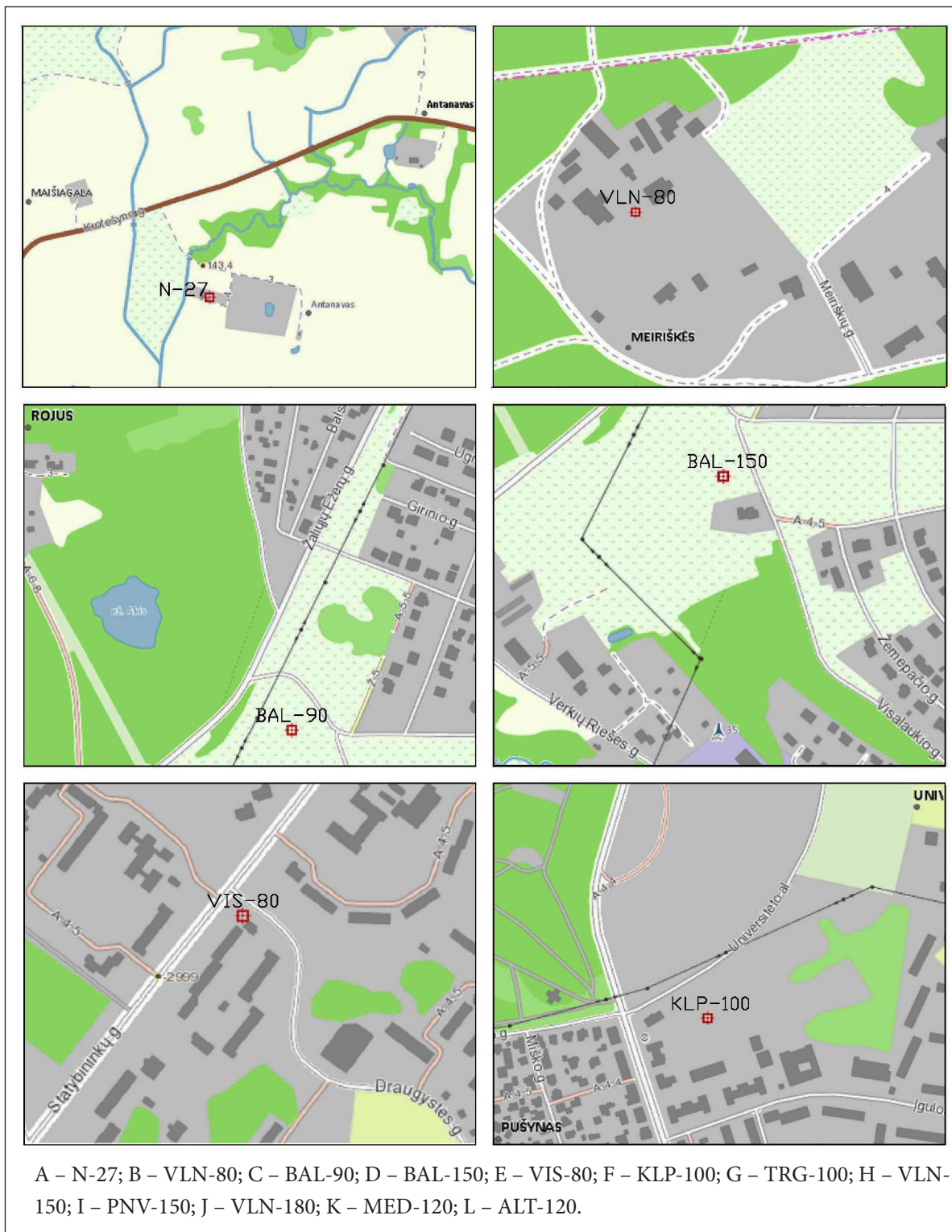
Fig. 1. The location of studied sites

- 1) Vilnius – 180 (VLN-180); 2) Vilnius – 150 (VLN-150); 3) Balsiai – 150 (BAL-150);
- 4) Balsiai – 90 (BAL-90); 5) Vilnius – 80 (VLN-80); 6) Maišiagala – 27 (N-27);
- 7) Medininkai – 120 (MED-120); 8) Visaginas – 80 (VIS-80); 9) Panevėžys – 150 (PNV-150);
- 10) Klaipėda – 100 (KLP-100); 11) Tauragė – 100 (TRG-100); 12) Alytus – 120 (ALT-120).

Vilniaus m. apskrityje įrengti 7 gręžiniai, po vieną Klaipėdoje, Tauragėje, Panevėžyje, Alytuje ir Visagine. Gręžinių gylis nuo 27 iki 180 m. Geologinei sandarai apibūdinti gręžinių skylėse buvo atlikti litologiniai ir geofiziniai tyrimai. Gręžinių geologi-

niai pjūviai sudaryti interpretavus pragręžtų uolienų mėginių, gama ir elektros diagrafių duomenis.

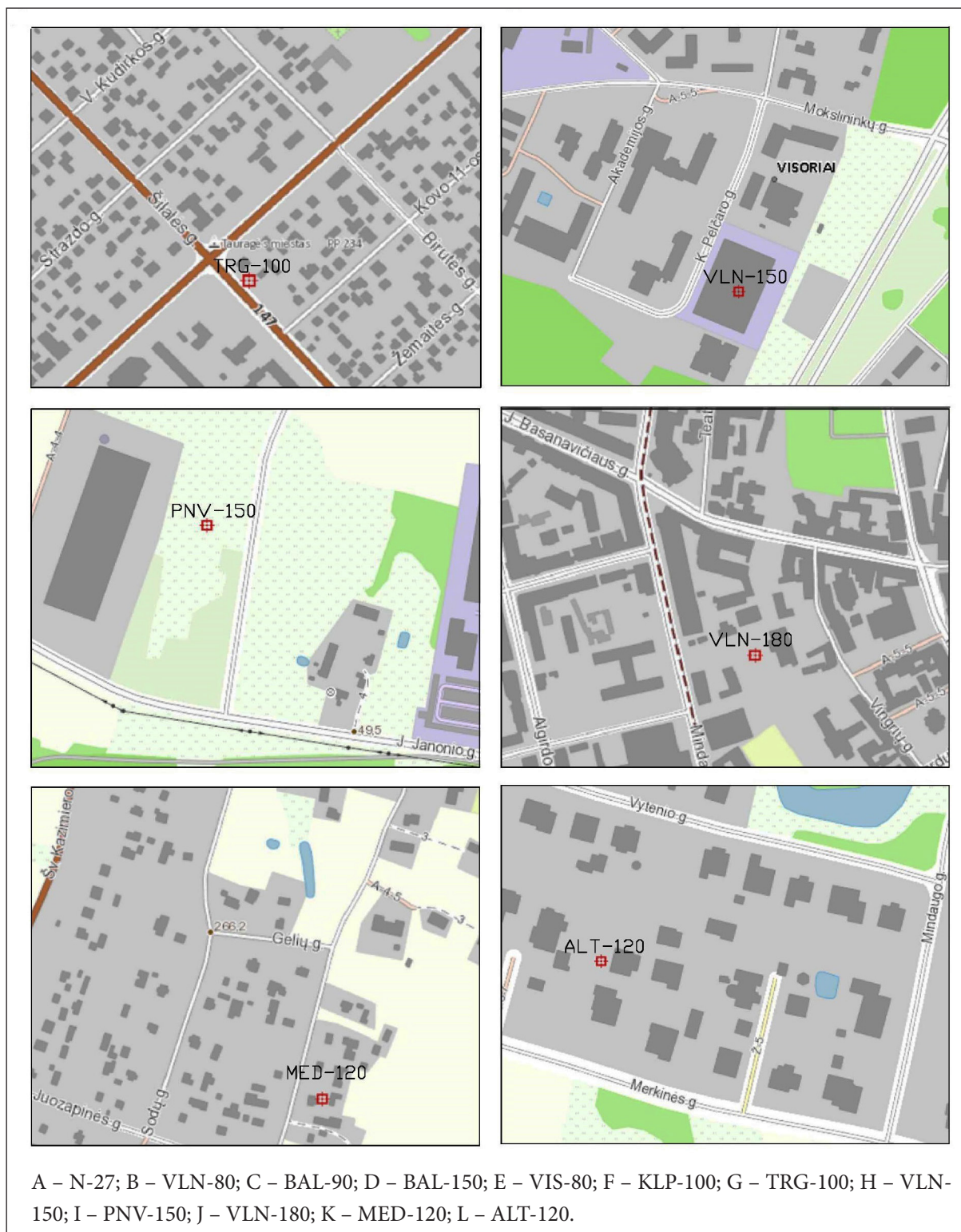
Septyniais gręžiniais buvo kiršta visa kvartero storumė ir pasiekti prekvartero dariniai, likę gręžiniai kvartero storumę kirto iš dalies (3 pav.).



2 pav. Geoterminių gręžinių vietų žemėlapis (tęsinys kitame puslapyje)

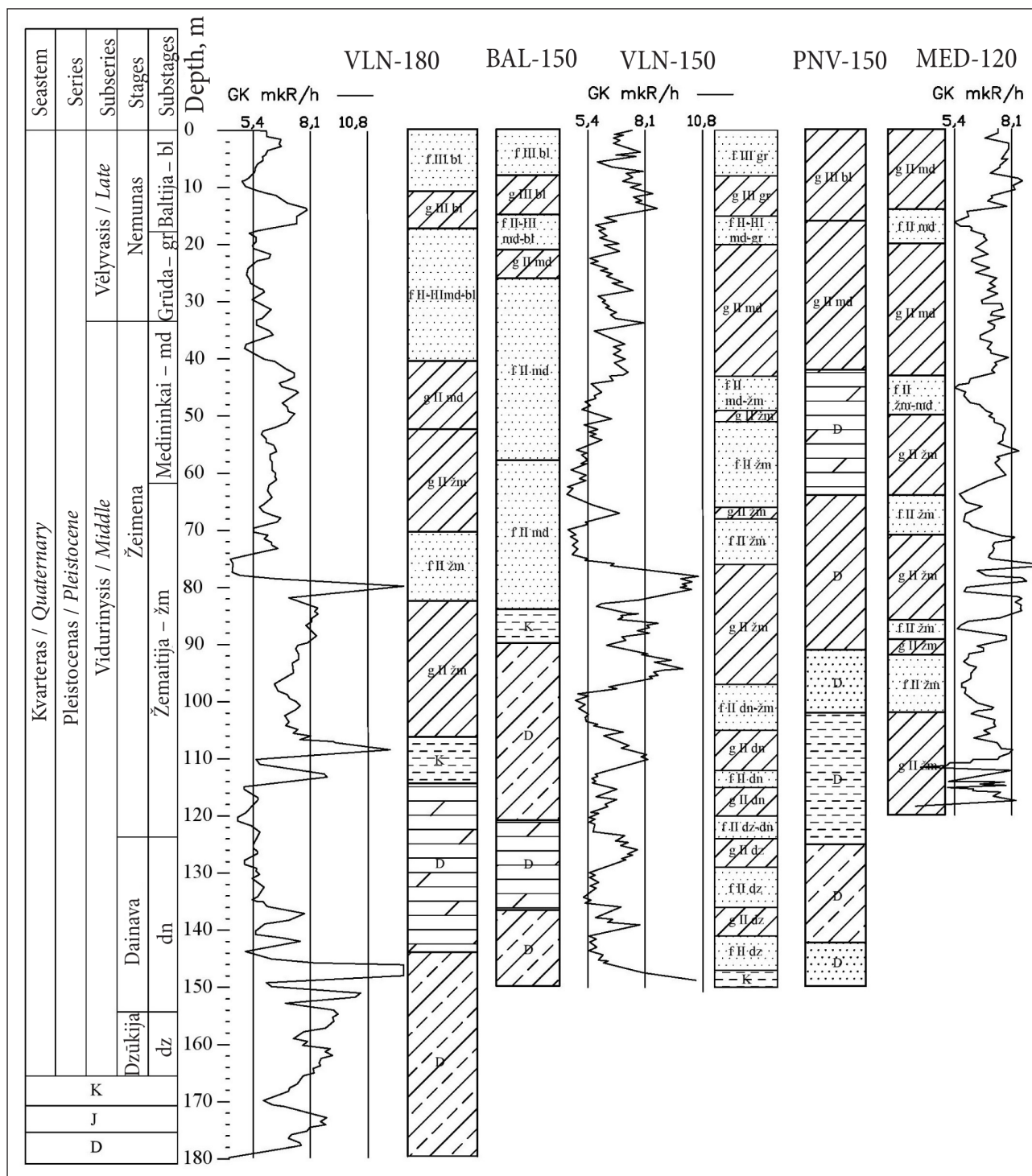
Fig. 2. The map of borehole heat exchangers (BHE) (continued on next page)

2 pav. (tęsinys)
Fig. 2. (continued)



Devono uolienos pasiektos trijuose gręžiniuose: Nr. BAL-150, PNV-150 ir VLN-180 (2D, I, J ir 3 pav.). Pragręžtų devono darinių storis atitinkamai yra 60; 112 ir 66 m, o kraigas nustatytas atitinkamai 90; 40 ir 114 m gylyje. Gręžiniuose

išskirti atskiri devono dolomito, klinčių, aleurito, smiltainio sluoksniai. Gręžinio Nr. BAL-150 geologiniame pjūvyje devono darinių storumė slūgso 90–150 m gylyje, sudaryta iš klinčių sluoksnio su dolomito tarp sluoksniu, esančiu 121–136 m



3 pav. Geoterminių gręžinių geologiniai pjūviai
 Fig. 3. Geological sections of the BHE

gylyje. Grėžinyje Nr. VLN-180 devono darinių storumė sudaryta iš dviejų atskirų dolomito ir klinties sluoksnių, kurių storis atitinkamai yra 30 ir 36 m. Grėžinyje PNV-150 devono uolienos slūgso 38–150 m gylyje. Nuo 38 iki 64 m aptinkamas dolomitas. Išskirti du 26 ir 17 m storio klintių sluoksniai, slūgsantys 64–90 ir 125–142 m gyliuose. Pjūvyje taip pat išskirtas 23 m storio aleurito sluoksnis, esantis 102–125 m gylyje. Apatinėje pjūvio dalyje, kaip ir 90–102 m gylio intervale, slūgso 8 m storio smėlingi dariniai.

Juros sistemos uolienos sudarytos iš juodos spalvos molio. Šie dariniai atidengti dviejuose grėžiniuose: Nr. KLP-100 ir TRG-100 (2F, G pav.). Jie slūgso apatinėse storumių dalyse ir atitinkamai yra 26 ir 15 m storio.

Kreidos sistemos uolienos (aleuritas) atidengtos keturiuose grėžiniuose: Nr. VLN-150, BAL-150, VLN-180 ir ALT-120 (2H, D, J, L pav.). Mažiausias kreidos sistemos uolienų storis yra grėžinyje Nr. VLN-150 ir siekia 2 m. Uolienos slūgso apatinėje geologinės storumės dalyje, 148–150 m gylyje. Didžiausias kreidos periodo uolienų storis atidengtas įrengiant grėžinį Nr. ALT-120. Geologinės storumės apačioje nuo 80 iki 120 m gylio išsidėstęs 40 m storio aleurito sluoksnis. Grėžiniuose Nr. BAL-150 ir VLN-180 kreidos uolienas sudaro 6 ir 8 m storio aleurito tarp sluoksniai, esantys 84–90 ir 96–104 m gyliuose.

Kvartero geologinės storumės uolienos atidengtos įrengiant visus (12) tiriamuosius geoterminius grėžinius. Grėžinio Nr. VLN-150 įrengimo metu buvo atidengta stratigrafiniu požiūriu visa kvartero uolienų storumė. Jos storis siekia 148 m. Mažiausias kvartero darinių storis yra grėžinyje Nr. N-27 – tik 27 m.

Dzūkijos ir Dainavos svitų uolienos atidengtos įrengiant grėžinį Nr. VLN-150. Bendras darinių storis – 36 m. Jie sudaryti iš trijų atskirų 4 m storio moreninio priesmėlio, priemolio sluoksnių, slūgsančių 136–140; 125–129 ir 116–120 m gylio intervaluose, ir keturių tarpmoreninių fluvio-glacialinių nuosėdų sluoksnių, kurių storis siekia 24 m.

Žemaitijos svitos dariniai išskirti grėžinių Nr. VLN-150, BAL-150, VLN-180, MED-120, ALT-120, KLP-100, TRG-100, BAL-90 ir VLN-80 geologiniuose pjūviuose. Atskirų moreninių darinių storis kinta nuo poros metrų storio tarp sluoksnio iki 30–32 m storio atskiro moreninio priemolio, priesmėlio sluoksnio. Vyraujantis at-

skirų molingų nuogulų storis siekia 20–22 m. Fluvio-glacialinės nuosėdos sudaro 15–22 m storio atskirus sluoksnius ir iki 10 m storio smėlingus tarp sluoksnius moreninių darinių storumėje.

Medininkų svitos darinių storumė išskirta visuose (be Nr. N-27) grėžiniuose. Ji sudaryta iš moreninio priesmėlio, priemolio. Vyraujantis atskirų molingų sluoksnių storis yra 22 m. Grėžinyje BAL-150 moreniniai Medininkų svitos dariniai išskirti kaip atskiras 6 m storio moreninio priesmėlio sluoksnis, o grėžiniuose VIS-80 ir ALT-120 jie sudaro atskiras 30 ir 32 m molingų darinių storumes. Didžiausias fluvio-glacialinių nuogulų storis nustatytas grėžiniuose Nr. BAL-90 ir VIS-80. Jis siekia 22–30 m. Kituose grėžiniuose šios nuogulos sudaro 5–12 m storio sluoksnius.

Viršutinio Nemuno visų grėžinių dariniai slūgso žemės paviršiuje, išskyrus Nr. MED-120 ir ALT-120. Glacialiniai moreninio priemolio, priesmėlio dariniai sudaro atskirus 6–17 m storio sluoksnius. Didžiausias tarpmoreninių fluvio-glacialinių darinių sluoksnis išskirtas grėžinyje Nr. VIS-80, čia jo storis siekia 24 m. Kitur smėlingų darinių storis kinta nuo 5 iki 10 m.

METODIKA

Uolienų šiluminis laidumas gali būti nustatytas laboratorijoje, atliekant grunto mėginių bandymus ir lauko sąlygomis tiriant uolienas *in situ*. Atskirų gruntų mėginių šiluminiui laidumui nustatyti laboratoriniu būdu plačiai taikomas „karštosios dėžės“ (angl. *hot box*) metodas (Asbrubali ir kt., 2010). Didžiausias laboratorinių tyrimų trūkumas, kad nesuardytos sandaros mėginių gavimo kaštai auga didėjant gyliui, o mėginių konservuojant ir transportuojant bandinyje dėl pakitusių aplinkos sąlygų pakinta ir jo būseną. Įrengiant geoterminius grėžinius ir grėžiant rotoriniu būdu su praplovimu paimti nesuardytos sandaros mėginių nėra galimybės. Drėgni gruntai tyrimo metu džiūna, juose atsiranda trūkiai, susidaro oro tarpai, todėl gautos reikšmės atspindi tik mėginio, o ne *in situ* slūgsančių uolienų savybes.

XX a. 6-ajame dešimtmetyje suformuluotos teorinės prielaidos tirti uolienų šiluminės charakteristikas lauko metodais (Carlslaw, Jaeger, 1959). Vieni pirmųjų tokio tipo tyrimų atlikti devintajame praeito amžiaus dešimtmetyje Linkopinge (Švedija) įrengiant šimto vienetų 10 m gylio

geoterminių gręžinių sistemą, skirtą šiluminę energiją kaupti žemės gelmėse (Sanner ir kt., 2008). Pastarąjį dešimtmetį geologinės stovymės uolienų šiluminiam laidumui nustatyti plačiai naudojamas geoterminių gręžinių terminės reakcijos tyrimo (Thermal Response Test – TRT) metodas (Eklöf, 1996; Sanner ir kt., 2008), kuris leidžia tiesiogiai tirti visą geologinę stovymę. Tyrimo metu gaunami duomenys apie *in situ* slūgsančių geologinių sluoksnių visumą.

Apibendrintas stovymės šiluminio laidumo nustatymas atliktas vadovaujantis ISO 17628:2015 standartu. Duomenų kaupimo įranga sukurta Baltijos pažangiųjų technologijų institute, įrenginį sudaro: cirkuliacijos siurblys, šilumnešio kaitinimo talpa, temperatūros duomenų kaupikliai, slėgio, cirkuliacijos ir elektros sąnaudų apskaitos prietaisai. Tyrimo metu prie geoterminio gręžinio prijungus įrangą atliekamas šiluminės energijos perteikimas žemės gelmėms ir kaupiami į žemės gelmes tiekiamo ir iš gelmių grįžtančio šilumnešio temperatūros, elektros energijos sąnaudų ir hidraulinių charakteristikų kitimo bėgant laikui duomenys. Šilumnešio srautų temperatūros skirtumas priklauso nuo geologinio pjūvio ir jį sudarančių uolienų šiluminių charakteristikų visumos. Gelmių temperatūrinio lauko išraiška išilgai gręžinio ašies, esant pastoviam įpumpuojamos šilumos kiekiui (q), gali būti užrašyta kaip funkcija, priklausanti nuo gręžinio spindulio (r), laiko (t) ir geologinės stovymės šiluminio bei temperatūrinio laidumo (Carslaw, Jaeger, 1959; Palaitis, Indriulionis 2012; 2015).

$$T_b^q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right); \quad (1)$$

q – šiluminės energijos srautas, λ – uolienų šiluminis laidumas, α – uolienų temperatūrinis laidumas, r – gręžinio spindulys, t – laikas, E – Eulerio skaičius.

Šilumos laidumas – pernašos reiškinys, kadangi yra temperatūros gradientas, molekulės perduoda kinetinę energiją. Tiesinės priklausomybės sprendiniai gelmių temperatūriniam laukui aprašyti plačiai naudojami nuo XX a. I pusės (Ingersoll, Plass, 1948). Efektyvų uolienų šiluminį laidumą (λ [W/m²K]), naudojant TRT tyrimo metu sukauptus šilumnešio temperatūros kitimo bėgant laikui duomenis, aprašo išraiška (Sanner ir kt., 2005):

$$\lambda = \frac{Q}{k4\pi H}; \lambda = \frac{Q}{k4\pi H}; \quad (2)$$

k – vidutinės šilumnešio temperatūros priklausomybės nuo laiko logaritmo kreivės polinkio kampas; Q – pumpuojamos šiluminės energijos kiekis, H – tiriamojo geoterminio gręžinio gylis.

Siekiant tiksliau interpretuoti atskirų geologinių sluoksnių storį, slūgsojimo gylio intervalus geoterminių gręžinių įrengimo metu gręžinio skylėse, buvo atlikti geofiziniai gama spinduliuotės tyrimai. Jų duomenys koreliuoti su gręžimo metu gautais pagręžtų uolienų mėginių duomenimis. Po geoterminio gręžinio įrengimo darbų praėjus mažiausia trims paroms, atliktas TRT tyrimas. Kompleksinis tyrimas, kai šiluminio laidumo duomenys gretinami su geofizinių tyrimų duomenimis, leidžia susieti stovymės sudėtį su šiluminiu laidumu ir geriau suprasti geoterminių išteklių formavimąsi.

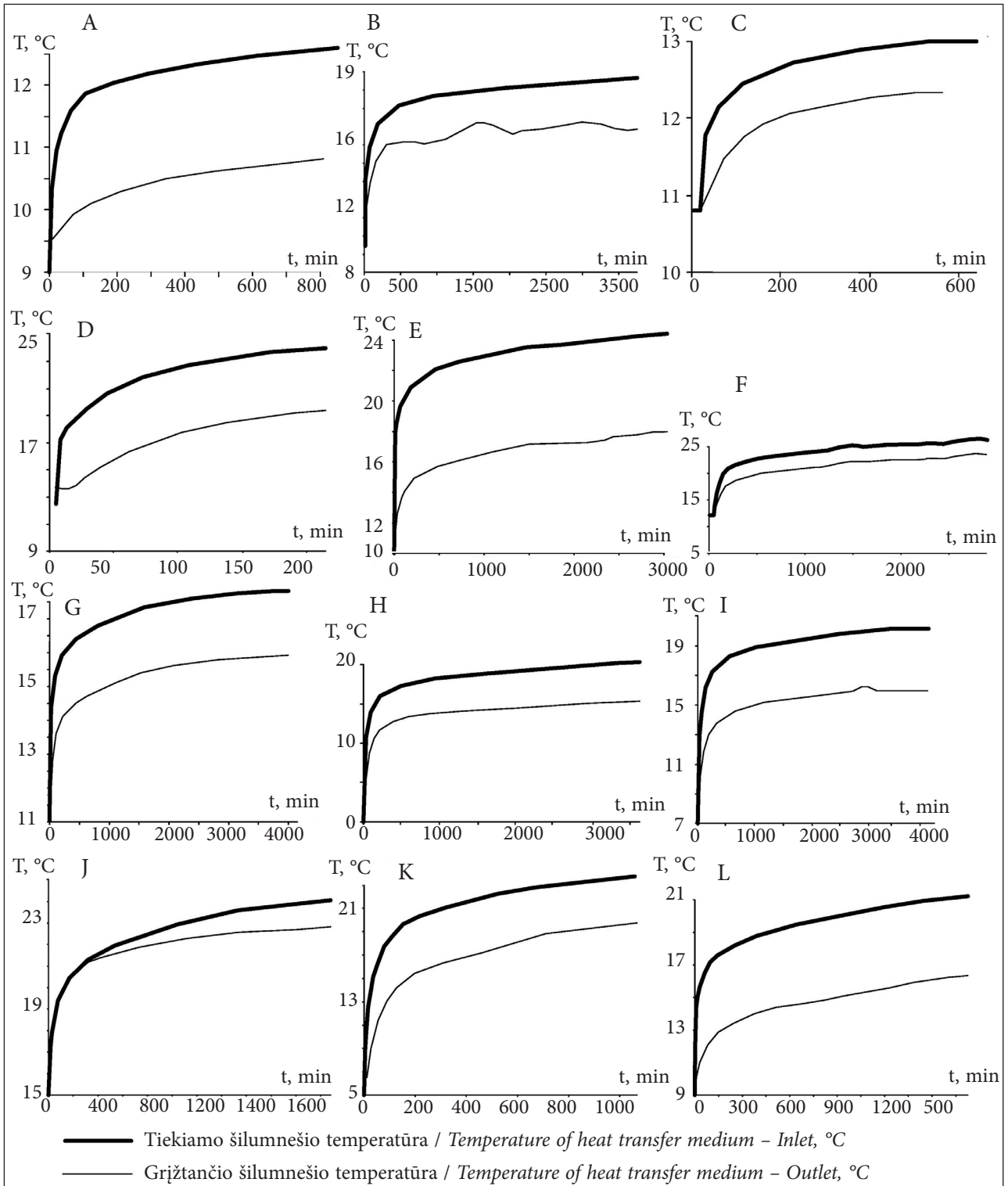
TYRIMŲ REZULTATAI

Atsižvelgiant į gręžiniuose atliktų TRT tyrimų rezultatus nustatytas apibendrintas stovymės sudarančių uolienų šiluminis laidumas (λ), kuris kinta nuo 1,84 iki 2,22 W/m²K (4 pav., lentelė). Gautos šiluminio laidumo vertės, atsižvelgiant į reikšmės dydį, sąlyginai suskirstytos į tris grupes.

Lentelė. Geologinės sudėties ir šiluminio laidumo tyrimo rezultatų suvestinė

Table. Summary table of geological structures and heat conductivity data

Nr. / No.	Gylis Depth	λ , W/m ² K	Darinių kiekis Amount of material %	
			smėlingi sandy	molingi clayey
ALT-120	120	1,84	11	89
MED-120	120	2,05	30	70
PNV-150	150	2,22	31	69
N-27	27	2	37	63
VLN-150	150	2,21	41	59
TRG-100	100	2,04	42	58
KLP-100	100	2,1	47	53
VLN-180	180	2,22	51	49
VLN-150	150	2,21	53	47
VIS-80	90	2,03	63	37
VLN-90	90	2,08	63	37
VLN-80	80	2,09	67	33



4 pav. Terminės reakcijos tyrimų duomenys

Fig. 4. Thermal response test data

A – VLN-80; B – PNV-150; C – VIS-80; D – KLP-100; E – VLN-180; F – VLN-150; G – TRG-100; H – ALT-120; I – MED-120; J – N-27; K – BAL-90; L – BAL-150.

Didžiausias šiluminis laidumas – nuo 2,21 iki 2,22 W/m^2K – nustatytas gręžiniuose, kurių gylis siekia 150–180 m (4B, E, F, L pav.). Mažiausias šilu-

minis laidumas – 1,84 ir 2 W/m^2K (4I, J pav.) – nustatytas gręžiniuose ALT-120 ir N-27, įrengtuose Alytuje ir Antanavo k. (Maišiagalos sen.). Gręžinių

gylis yra 27 ir 120 m. Vidutinės šiluminio laidumo vertės nustatytos gręžiniuose VLN-80, VIS-80, VLN-90, TRG-100, KLP-100, MED-120 kinta nuo 2,03 iki 2,1 W/m³K. Gręžiniai įrengti Vilniuje, Klaipėdoje, Tauragėje ir Medininkuose, jų gylis siekia 80–100 m.

Didžiausios šiluminio laidumo vertės, atsižvelgiant į geologinę sudėtį, nustatytos gręžiniuose, kuriais prasigręžta į devono klintis ir dolomitą. Gręžiniais BAL-150 ir VLN-180 taip pat kiršta ir 8 m storio kreidos mergelio stovymė.

Didelis šiluminis laidumas (2,21 W/m³K) nustatytas ir gręžinyje VLN-150, jo gylis yra 150 m. Šiame gręžinyje kvartero stovymę sudaro 9 atskiri moreninio priesmėlio, priemolio sluoksniai, kurių storis nuo 5 iki 22 m, ir 10 smėlingų tarp sluoksnių, kurių storis nuo 3 iki 16 m. Paskutiniai du metrai įgręžti į kreidos mergelį.

Mažiausia vertė – 1,84 W/m³K – nustatyta gręžinyje ALT-120. Pragręžtos 80 m storio kvartero nuogulos, sudarytos iš trijų priesmėlio, priemolio sluoksnių, kurių storis 17–32 m, ir dviejų smėlio tarp sluoksnių, kurių storis 4 ir 8 m. Taip pat 40 m įsigręžta į kreidos mergelio nuogulas.

Tauragės ir Klaipėdos gręžiniuose TRG-100 ir KLP-100, kurių gylis siekia 100 m, nustatytas šiluminis laidumas yra 2,04 ir 2,1 W/m³K. Gręžiniais buvo kiršta kvartero stovymė ir įsigręžta į jūros uolienas. Klaipėdoje kvartero stovymė sudaryta iš 3 priesmėlio, priemolio sluoksnių, kurių storis nuo 8 iki 42 m, ir 3 smėlio tarp sluoksnių, kurių storis siekia 4–14 m. Tauragėje kvartero stovymė sudaryta iš 2 priemolio, priesmėlio sluoksnių, kurių storis 20 ir 23 m, ir trijų smėlio sluoksnių, kurių storis nuo 7 iki 20 m. Gręžiniu KLP-100 į jūros uolienas įsigręžta 26 m, o Tauragėje – 15 m. Jūros uolienos sudarytos iš juodos spalvos molio.

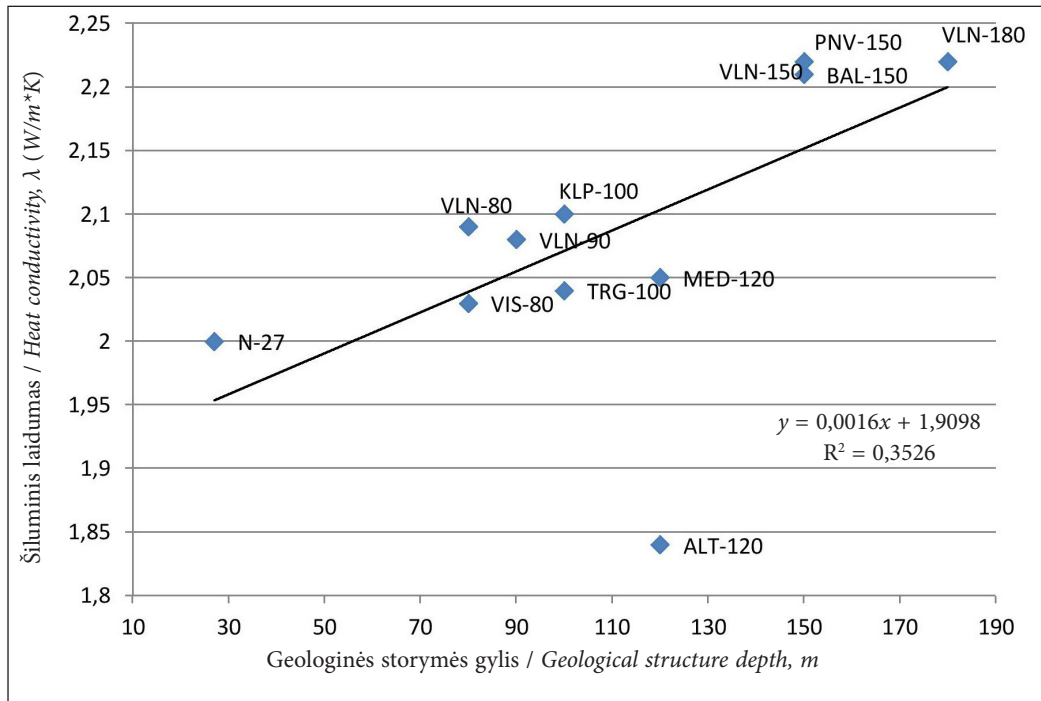
Šiluminis laidumas nuo 2 iki 2,1 W/m³K nustatytas gręžiniuose, kurie nekirto kvartero stovymės. Jų gylis siekia 27–120 m. Kvartero stovymėje išskirta nuo 2 (BAL-90 ir VIS-80) iki 5 (MED-120 ir VLN-80) priesmėlio, priemolio sluoksnių, kurių storis siekia 3–30 m. Taip pat išskirta nuo 2 (VIS-80) iki 6 (VLN-80) smėlio tarp sluoksnių, kurių storis 4–30 m. Tik gręžinyje N-27 išskirtas vienas 17 m storio priemolio ir vienas 10 m storio smėlio sluoksniai. Šiame gręžinyje nustatytas šiluminis laidumas siekia 2 W/m³K – tai mažiausias šiluminis laidumas iš gręžinių, kuriais įsigręžta į kvartero nuogulas.

DUOMENŲ APTARIMAS

Lietuvoje tokie tyrimai atlikti pirmą kartą. Rezultatai rodo, kad gręžiniuose nustatytas šiluminis laidumas yra kaitus, vertės kinta nuo 1,84 iki 2,22 W/m³K.

Analizuojant gręžinių Nr. VLN-80 ir VIS-80; TRG-100 ir KLP-100 duomenis pastebėta, kad vienodo gylio gręžiniuose, įrengtuose panašios sudėties geologinėse stovymėse, esančiose skirtingose geografinėse vietose, nustatytos panašios šiluminio laidumo vertės. Tai gali būti paaiškinta tuo, kad pagrindiniai geoterminių išteklių formavimosi veiksniai lyginamosiose teritorijose yra tapatūs. Viršutinėje aktyvios požeminio vandens apykaitos zonoje susikaupęs gėlas požeminis vanduo (Mokrik, 2003). Vandeningi sluoksniai, slūgsantys maždaug 20 m gylyje, pasižymi santykinai pastoviomis temperatūromis. Gilėjant gelmių temperatūra didėja pagal geoterminį gradientą. Dugiametė vidutinė oro temperatūra Lietuvoje siekia 6,5 ir skirtingose rajonuose kinta 1,0 K ribose (Giedraitienė, Putys, 2012). Maži aplinkos sąlygų svyravimai pastebimos įtakos geologinės stovymės šiluminiam laidumui neturi.

Tiriant šiluminio laidumo priklausomybę nuo stovymės sandaros ir gręžinio gylio (5, 6 pav.) nustatyta, kad šiluminio laidumo priklausomybė nuo gręžinio gylio yra maža. Koreliacijos koeficientas $r = 0,59$. Kadangi laboratoriniu būdu nustatytas priesmėlio ir priemolio šiluminis laidumas gerėja didėjant uolienos tankiui, vadinasi, su tuo galima sieti ir nustatytą verčių didėjimą (Abu-Hamdeh, Reeder, 2000), o atlikti nuosėdinių uolienų šiluminio laidumo tyrimai slegiant uolienas parodė, kad didžiausias šiluminio laidumo padidėjimas vyksta kintant slėgiui nuo 1 iki 11 MPa (Lauser, Huenges, 1995). Tyrimų, atliktų su skirtingos frakcijos ir skirtingo tankio kvarcinio smėlio mėginiais, rezultatai rodo, kad slegiant mėginį nuo atmosferinio iki 10 MPa slėgio šiluminio laidumo vertė vidutiniškai padidėja 8,3 % (Presley, Christensen, 1997). Pasiiekus šią slėgio ribą uolienų šiluminis laidumas didėjimas lėtėja. Darant prielaidą, kad vidutinis nuosėdinių uolienų tankis yra 2 000 kg/m³, gamtinėmis sąlygomis toks slėgis būtų pasiektas 50–55 m gylyje. Analizuojant gręžinių Nr. VIS-80, BAL-90 ir VLN-180 duomenis matyti, kad gręžiniai įrengti pagal litologinę sudėtį į vienodas stovymes (lentelė). Giliausiame, 180 m gylio, gręžinyje VLN-180

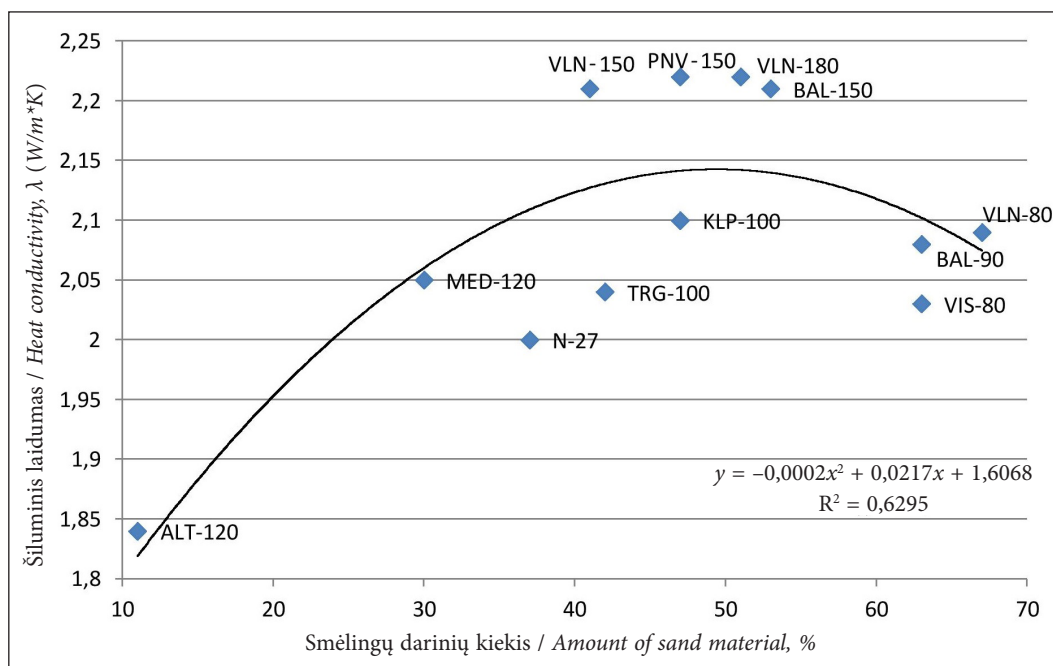


5 pav. Tirtųjų geologinių storių šiluminio laidumo priklausomybė nuo gręžinio gylio
Fig. 5. Relationship of heat conductivity vs well depth of the studied geological sections

nustatytas šiluminis laidumas 2,22 W/m*K yra 9,4 % didesnis už 100 m seklesniame gręžinyje VIS-80 nustatytą vertę 2,03 w/m*K. Šis pavyzdys parodo, kad geologinių storių, kurių sudėtyje yra 67 % smėlingų darinių, o gylis kinta nuo 80 iki

180 m šiluminio laidumo, vertė vidutiniškai išauga 0,94 % gyliui padidėjus 10 m.

Gręžiniuose, kurių gylis yra 150 ir 180 m, nustatytos didžiausios šiluminio laidumo vertės – 2,21 ir 2,22/m*K (5 pav.). Gręžinių, kurių gylis siekia



6 pav. Tirtųjų geologinių storių šiluminio laidumo priklausomybė nuo smėlingų darinių kiekio
Fig. 6. The heat conductivity dependence on sand material in the studied geological sections

80–120 m, šiluminis laidumas kinta nuo 2,03 iki 2,1 W/m*K. Sekliausiame gręžinyje N-27, kurio gylis 27 m, nustatyta mažesnė šiluminio laidumo vertė – 2 W/m*K. 120 m gylio gręžinyje MED-120 nustatyta mažiausia šiluminio laidumo vertė – 1,84 W/m*K.

Siekiant nustatyti šiluminio laidumo koreliaciją nuo storumę sudarančių sluoksnių litologijos pagal gama diagrafijos duomenis, įvertintas bendras storumės molingumas (Szabó, 2011).

$$V_{sh} = \frac{CGR - CGR_{\min}}{CGR_{\max} - CGR_{\min}}; \quad (3)$$

V_{sh} – molingų darinių tūris, CGR – užregistruota vertė (angl. *computed gamma ray*), CGR_{\min} ir CGR_{\max} – mažiausia ir didžiausia užregistruota vertė.

Tirtųjų geologinių storumių molingumas yra nuo 11 iki 67 % (lentelė). Gręžiniuose, kurių geologiniame pjūvyje smėlingi dariniai sudaro 41–67 %, nustatytos šiluminio laidumo vertės kinta nuo 2,03 iki 2,22 W/m*K. Gręžinių gylis – nuo 80 iki 180 m. Mažiausios šiluminio laidumo vertės nustatytos gręžiniuose N-27 ir ALT-120, kurių gylis siekia 27 ir 120 m. Gręžinio ALT-120 geologiniame pjūvyje smėlingi dariniai sudaro 11 %, o N-27 – 37 %. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad laboratoriniu būdu nustatytos smėlingų darinių šiluminio laidumo vertės yra didesnės nei molingų (Hamdhan, Clarke, 2010). Smėlingų gruntų šiluminio laidumo padidėjimas taip pat priklauso ir nuo mėginio prisotinimo vandeniu. Tokios pačios drėgmės smėlingų uolienu šiluminis laidumas yra didesnis nei molingų (Fricke ir kt., 1992). Statistiškai apdorojus apibendrinto šiluminio laidumo ir geologinių storumių litologijos duomenis rasta matematinė antro laipsnio daugianarė funkcija $y = -0,0002x^2 + 0,0217x + 1,6068$, nusakanti šiluminio laidumo koreliaciją su litologine storumės sudėtimi. Kreivė gerai siejasi su faktiniais duomenimis, koreliacijos koeficientas $r = 0,79$ (6 pav.).

IŠVADOS

1. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad panašios sandaros geologinės storumės Lietuvos teritorijoje pasižymi panašiomis šiluminio laidumo vertėmis ir nepriklauso nuo vietos. Storumių šiluminėms charakteristikoms prognozuoti gali būti naudojamas geologinių sąlygų panašumo principas.

2. Nustatyta, kad geologinės storumės, sudarytos iš 67 % smėlingų ir 33 % molingų darinių, apibendrinto uolienu šiluminio laidumo vertė gylio intervale nuo 80 iki 180 m vidutiniškai išauga 0,94 %, gyliui padidėjus 10 m. Tirtųjų storumių šiluminio laidumo priklausomybės nuo gylio koreliacijos koeficientas $r = 0,59$.

3. Storumės šiluminis laidumas gerėja didėjant storumę sudarančių smėlingų darinių kiekiui. Tokio paties gylio didesnio smėlingumo storumėse nustatytos aukštesnės šiluminio laidumo vertės. Šiluminio laidumo priklausomybės nuo storumės litologinės sudėties matematinės funkcijos koreliacijos koeficientas $r = 0,79$.

4. Siekiant nustatyti atskirų geologinių sluoksnių įtaką storumės šiluminiam laidumui reikia atlikti papildomus tyrimus ir sukaupti didesnę duomenų kiekį.

PADEKA

Tyrimus finansavo Lietuvos mokslo taryba (Reg. Nr. 023059D). Autoriai dėkoja UAB „Hidro Geo Consulting“ už galimybę naudotis duomenis.

Gauta 2016 11 24
Priimta 2016 12 06

LITERATŪRA

1. Abu-Hamdeh N. H., Reeder R. C. 2000. Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 1285–1290.
2. Asdrubali F., Baldinelli G., Bianchi F., Libbra A., Muscio A. 2010. Comparative analysis of different methods to evaluate the thermal conductivity of homogenous materials. *ASME-ATI-UTT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, Sorrento, Italy*.
3. Eklöf C., Gehlin S. 1996. *TED – A Mobile Equipment for Thermal Response Test*. Master Thesis. Luleå: Luleå University of Technology.
4. Fricke B. A., Misra A., Becker B. R., Stewart W. E. 1992. *Soil Thermal Conductivity: Effects of Saturation and Dry Density*. University of Missouri-Kansas City.
5. Hammad I. N., Clarke B. G. 2010. Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils. *World Geothermal Congress, 25–29 April 2010, Bali, Indonesia*.
6. Clauser C., Huenges E. 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals. In: T. J. Ahrens (ed.). *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union.

7. Presley M. A., Christensen P. R. 1997. The effect of bulk density and particle size sorting on the thermal conductivity of particulate materials under Martian atmospheric pressure. *Journal of Geophysical Research*. 102 (E4): 9221–9229.
8. Sanner B., Mands E., Sauer M. K., Grundmann E. 2008. Thermal response test, a routine method to determine ground properties for GSHP design. *Proceedings of 9th International IEA Heat Pump Conference, 20–22 May 2008, Zurich, Switzerland*.
9. Szabó N. P. 2011. Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data. *Acta Geophysica*. 59: 935–953, DOI:10.2478/s11600-011-0034-0
10. Palaitis Ž., Indriulionis A. 2015. Geologinių sluoksnių šiluminių charakteristikų tyrimas ir jų naudojimo galimybės Lietuvoje. *Geologijos akiračiai*. 2: 11–15.
11. Palaitis Ž., Indriulionis A. 2012. Evaluation of ground thermal properties and specification of the geological structure using thermal response test. Natural gamma and resistivity data. *Geologija*. 54, 4(80): 125–135.
12. Mokrik R. 2003. *Baltijos baseino paleohidrogeologija*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla. 333 p.
13. Giedraitienė J., Pukys P. 2012. *Požeminio vandens aktyviosios apytakos zonos hidrogeotermija*. LGT fondas Nr. 36340. 66 p.
14. *Thermal Transmittance by Hot Box Method*. SP Technical Research Institute of Sweden. Energy Technology.
15. *European Standard EN ISO 17628:2015, Geotechnical investigation and testing – Geothermal testing – Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger*.
16. <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/atsinaujinantys-energijos-istekliai>
17. <http://www.geoterma.lt/?lang=1&type=1&f=4&id=38&name=%C5%A0ilumos%20gamyba>

Žygimantas Palaitis, Jonas Satkūnas

CORRELATION BETWEEN THE COMPOSITION OF GEOLOGICAL SECTIONS AND HEAT CONDUCTIVITY

Summary

The heat conductivity of a geological section is determined using a borehole heat exchanger in accordance with the international ISO 17628: 2015 standard. This article presents the correlation of thermal conductivity with the lithology of a geological section and the total depth of the borehole. An overview of laboratory and field research methods for the determination of the heat conductivity of the material with their advantages and disadvantages is provided, as well as similarity method principles of use for the prediction of parameters are presented. The thermal conductivity of a geological structure is evaluated by using a Thermal Response Test (TRT) data using a line-source method. The analysis of the collected data allows the identification of the functions of the structure's heat conductivity and its dependence on geological conditions.

Keywords: borehole heat exchanger, shallow heat conductivity, heat conductivity of rocks