

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

**Arminas Stanionis**

**ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲ JUDESIŲ IGNALINOS ATOMINĖS  
ELEKTRINĖS RAJONE TYRIMAS GEODEZINIAIS METODAIS**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, matavimų inžinerija (10T)

Vilnius, 2005

Disertacija rengta 2002–2005 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Algimantas ZAKAREVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

Konsultantai:

prof. habil. dr. Romualdas BAUŠYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T);

habil. dr. Saulius ŠLIAUPA (Geologijos ir geografijos institutas, fiziniai mokslai, geologija – 05P).

## TURINYS

|                                                                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ĮVADAS.....</b>                                                                                                                                  | <b>5</b>  |
| <b>1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....</b>                                                                                  | <b>9</b>  |
| 1.1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMŲ APŽVALGA<br>IR TYRIMŲ METODOLOGINIAI PRINCIPAI.....                                             | 9         |
| 1.2. ŽEMĖS PLUTOS TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ TYRIMŲ<br>GEODEZINIAIS METODAIS APŽVALGA.....                                                                  | 16        |
| 1.3. IŠVADOS.....                                                                                                                                   | 17        |
| <b>2. LIETUVOS TERITORIJOS TEKTONINĖ SANDARA IR GEODEZINIŲ<br/>TINKLŲ ŽEMĖS PLUTOS JUDESIAMS TIRTI NAUDOJIMO GALIMYBĖS..</b>                        | <b>19</b> |
| 2.1. LIETUVOS TERITORIJOS TEKTONINĖS SANDAROS YPATUMAI.....                                                                                         | 19        |
| 2.2. GEODEZINIŲ TINKLŲ HORIZONTALIESIEMS ŽEMĖS PLUTOS JUDESIAMS TIRTI<br>PANAUDOJIMAS .....                                                         | 26        |
| 2.3. IGNALINOS ATOMINĖS ELEKTRINĖS GEODINAMINIS POLIGONAS.....                                                                                      | 29        |
| 2.4. IŠVADOS.....                                                                                                                                   | 32        |
| <b>3. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMO METODIKA....</b>                                                                                   | <b>33</b> |
| 3.1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TENZORIAUS KOMPONENČIŲ<br>ĮVERTINIMAS IR DEFORMACIJŲ SKAIČIAVIMAS.....                                 | 33        |
| 3.1.1. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir poslinkių sąsajos.....                                                                            | 33        |
| 3.1.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afiniojo<br>koordinatų perskaičiavimo būdu.....                                           | 42        |
| 3.1.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tenzoriaus komponentų<br>skaičiavimas naudojant trikampio kraštinių ilgius ir direkcinis kampus..... | 44        |
| 3.1.4. Apibendrintosios horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų<br>charakteristikos.....                                                            | 46        |
| 3.2. ŽEMĖS PLUTOS TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ POKYČIŲ SKAIČIAVIMO METODIKA.....                                                                              | 50        |
| 3.3. IŠVADOS.....                                                                                                                                   | 53        |
| <b>4. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMAS IR<br/>REZULTATŲ ANALIZĖ.....</b>                                                                 | <b>54</b> |
| 4.1. LIETUVOS TERITORIJOS HORIZONTALIŲJŲ ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ<br>TRENDŲ SKLAIDOS STRUKTŪRA.....                                                 | 54        |
| 4.1.1. Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų charakteristikos.....                                                                                | 54        |
| 4.1.2. Horizontaliųjų deformacijų struktūrinis modelis.....                                                                                         | 59        |

|                                                                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir kristalinio pamato<br>struktūrinės tektoninės sandaros sąsajos.....                  | 62         |
| 4.2. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIOSIOS DEFORMACIJOS IR JŲ SKLAIDA IGNALINOS<br>ATOMINĖS ELEKTRINĖS GEODINAMINIO POLIGONO TERITORIJOJE..... | 65         |
| 4.3. TEKTONINIŲ ŽEMĖS PLUTOS ĮTEMPIŲ POKYČIAI IGNALINOS ATOMINĖS<br>ELEKTRINĖS RAJONE.....                                             | 70         |
| 4.4. HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ BEI TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ 2–D<br>MODELIAVIMAS ANSYS PROGRAMA.....                                         | 73         |
| 4.5. KOORDINAČIŲ SISTEMINGŲJŲ PAKLAIĐŲ ĮTAKA ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ<br>RODIKLIŲ ĮVERČIAMS.....                                       | 88         |
| 4.6. IŠVADOS.....                                                                                                                      | 99         |
| <b>IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....</b>                                                                                                      | <b>100</b> |
| <b>LITERATŪRA .....</b>                                                                                                                | <b>102</b> |
| <b>AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....</b>                                                                            | <b>123</b> |

## IVADAS

**Darbo aktualumas.** Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimas yra svarbi mokslinė ir praktinė problema, susijusi su geodezinių tinklų sudarymu bei naudojimu, sudėtingų ekologiškai pavojingų įrenginių statyba ir eksploatavimu, naudingųjų iškasenų paieškomis. Tyrimų rezultatai naudojami seismiškai aktyvioms teritorijoms nustatyti, įvertinti jų pavojingumo laipsnį bei dabartinių geodinaminių įtempių laukų charakteristikoms tirti. Šiuo metu, atsiradus didelio tikslumo ir naujos kokybės matavimams, geodeziniai matavimai yra ne tik informacijos šaltinis apie dabartinius Žemės plutos judesius kitiems mokslams, bet ir geodezijai reikalingi patikimi dabar vykstančių geodinaminių procesų duomenys. Šia informacija pagrįstas kinematinų ir dinaminių geodezijos uždavinių sprendimas leidžia pagerinti geodezinių tinklų tikslumą, pailginti jų eksploatavimo laiką.

Vertikalūs Žemės plutos judesiai sistemingai tiriami nuo dvidešimtojo amžiaus penktojo dešimtmečio. Horizontaliųjų judesių detalūs tyrimai apima nepilnus du paskutinius dešimtmečius. Todėl horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo duomenys yra ypatingai svarbūs, teikiantis išsamesnę informaciją apie dabartinius geodinaminius procesus ir tektoninius įtempius už vertikaliųjų judesių tyrimus. Detalūs tyrimai Ignalinos atominės elektrinės rajone yra labai svarbūs vertinant teritorijos seisminę riziką.

**Mokslinių tyrimų tikslas.** Patobulinti dabartinių Žemės plutos judesių rodiklių įvertinimo metodiką pagal geodezinius matavimus, taikant tenzorinę analizę, ir ištirti horizontaliuosius Žemės plutos judesius Ignalinos atominės elektrinės rajone.

Pagrindiniai uždaviniai darbo tikslui pasiekti:

- teoriškai pagrįsti bei sudaryti invariantiškus koordinačių sistemoms algoritmus Žemės plutos horizontaliosioms deformacijoms skaičiuoti pagal geodezinių matavimų duomenis;
- išnagrinėti baigtinių elementų metodo Žemės plutos deformacijų tenzorių komponentėms įvertinti ir praktinio taikymo galimybes horizontaliesiems Žemės plutos judesiams modeliuoti;
- parengti metodiką ir skaičiavimo algoritmus Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčiams įvertinti pagal geodezinių matavimų rezultatus;
- taikant parengtą metodiką ir skaičiavimo algoritmus, ištirti horizontaliuosius Žemės plutos judesius Ignalinos atominės elektrinės rajone;
- nustatyti dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos judesių ir tektoninių įtempių pokyčių sąsajas su teritorijos tektonine sąranga;
- išnagrinėti koordinačių nustatymo sistemųjų paklaidų įtaką Žemės plutos horizontaliųjų judesių rodiklių įverčiams.

**Tyrimų objektas.** Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas.

**Tyrimų metodika ir metodai.** Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtempių pokyčių tyrimas tenzorinės analizės būdu, tenzoriaus komponentes pagal geodezinių matavimų duomenis įvertinant baigtinių elementų metodu.

Žemės plutos horizontaliųjų judesių sklaidos modelio, sudaryto pagal geodezinių matavimų duomenis, identifikavimo patikimumui įvertinti taikomi matematinės statistikos metodai.

Dabartinių Žemės plutos geodinaminių procesų analizė bei Žemės plutos horizontaliųjų judesių interpretacija atlikta priimant, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ankstesnių geologinių periodų tektoninės raidos tęsinys ir atsispindi geologinėse struktūrose.

**Mokslinis naujumas.** Parengta metodika bei sudarytas skaičiavimo algoritmas, įvertinantis sąsajas tarp horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtempių pokyčių. Sąsajoms aprašyti pritaikytas Huko dėsnis.

Patobulinta horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų įvertinimo ir modeliavimo pagal matavimų duomenis metodika, deformacijų tenzorių elementams įvertinti taikytas baigtinių elementų metodas.

Gauti nauji horizontaliųjų Žemės plutos judesių ir jų geodinaminės interpretacijos Ignalinos atominės elektrinės rajone duomenys.

**Praktinė mokslinio darbo nauda.** Parengta horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų įvertinimo metodika ir algoritmai gali būti taikomi deformacijų analizei bei modeliavimui įvairaus dydžio lokaliuose, regioniniuose bei globaliuose objektuose.

Pasiūlyta horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo metodika gali būti panaudota vertinant seismiškai aktyvių teritorijų pavojingumą, parenkant sudėtingų ekologiškai pavojingų įrenginių statybos vietas, naudingųjų iškasenų paieškai atlikti.

Gautieji Žemės plutos judesių ir jų sąsajų su teritorijos tektoniniais ypatumais rezultatai Ignalinos atominės elektrinės rajone gali būti panaudoti ekogeodinaminei rizikai vertinti kaip sudėtinė seismo monitoringo sistemos dalis. Tam būtini tolimesni geodeziniai matavimai geodinaminiam poligone.

**Ginamieji teiginiai:**

- horizontaliųjų Žemės plutos judesių vertinimo ir modeliavimo pagal geodezinius matavimus metodika: teoriniai pagrindai ir algoritmai;

- Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčių nustatymo metodika panaudojant geodezinius matavimus;
- Žemės plutos horizontaliųjų judesių rodiklių įverčių nustatymas įvertinant geodezinių punktų koordinacių sistemingasias paklaidas;
- dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone nustatymo rezultatai ir jų geodinaminis interpretavimas;
- universaliųjų kompiuterinių programų fizinių deformuojamųjų kūnų modeliams sudaryti taikant baigtinių elementų metodą panaudojimas Žemės plutos horizontaliesiems judesiams ir tektoninių įtempių pokyčiams tirti.

**Darbo aptarimas.** Svarbiausi disertacijos darbo rezultatai aptarti ir svarstyti tarptautinėse bei respublikinėse mokslo konferencijose:

1. Horizontalių Žemės plutos judesių šiaurės Lietuvoje tendencijos // Respublikinė mokslo konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“. Vilnius. 2000 09 29.
2. Lietuvos geodezinio tinklo deformacijų analizė pagal trianguliacijos ir nulinės bei pirmosios klasės GPS tinklų duomenis // Respublikinė mokslo konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“. Vilnius. 2001 10 05.
3. Lietuvos geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų geotektoninis interpretavimas // Respublikinė mokslo konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“. Vilnius. 2002 10 28.
4. Žemės plutos deformacijų matavimai šiaurės rytų Lietuvoje // Konferencija „Metrologija ir matavimai“. Kaunas. 2003 04 29–30.
5. Geodetic Measurements for Estimation of Eco–Geodynamic Risks at the Area of Ignalina Nuclear Power Plant // 33<sup>e</sup> Symposium International FESF Strasbourg / Recent Developments in Environmental Protection. Vilnius. 2003 09 25–26.
6. Horizontaliosios Žemės plutos deformacijos Ignalinos atominės elektrinės rajone // Respublikinė mokslo konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“. Vilnius. 2003 10 17.
7. Ignalinos atominės elektrinės regiono dabartinis tektoninis aktyvumas // 7-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Vilnius. 2004 03 25.
8. Определение геодинамических деформаций и напряжений Земной коры региона Игналинской атомной электростанций по результатам геодезических измерений // International Scientific Methodical Conference „Land use and land management“ / Lithuanian university of agriculture. Kaunas–Akademija. 2004 05 12–14.
9. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtampų sąsajos // Respublikinė mokslo konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“. Vilnius. 2004 10 29.

10. Modelling of deformations and stresses of the Earth-crust in the zones of ecologically dangerous objects // International Symposium on Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. Spain. 2005 03 17–19.

11. Tektoninių įtempimų modeliavimas panaudojant GPS monitoringo duomenis // 8-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Vilnius. 2005 03 24.

12. Определение горизонтальных деформаций Земной коры по результатам ГПС мониторинга // Ежегодная научно–практическая конференция „Дни науки – 2005“. 2005 04 15–27.

13. Crustal deformations of the GPS polygon of the Ignalina NPP: application of finite element modelling for geodynamic implications // The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering“. Vilnius. 2005 05 26–27.

**Publikacijos.** Disertacijos tema parengta ir paskelbta 16 mokslinių publikacijų.

**Apimtis ir struktūra.** Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados ir pasiūlymai, literatūros šaltinių sąrašas (236 šaltiniai), autoriaus mokslinių publikacijų sąrašas (16 publikacijų). Darbo apimtis – 124 psl.

**Padėkos.** Autorius ypač dėkoja darbo vadovui prof. habil. dr. A. Zakarevičiui už suteiktus originalius mokslinius patarimus bei pastabas rengiant disertaciją.

Autorius dėkoja prof. habil. dr. R. Baušiui ir habil. dr. S. Šliaupai, kurių mokslinės konsultacijos padėjo kvalifikuotai paruošti disertaciją.

Autorius dėkoja Geodezijos ir kadastro katedros bei Geodezijos instituto darbuotojams, kurie teikė naudingus patarimus disertacijos rengimo metu.

## **1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMŲ APŽVALGA**

### **1.1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR TYRIMŲ METODOLOGINIAI PRINCIPAI**

Horizontaliesiems Žemės plutos judesiams tirti naudojami tikslūs geodezinių tinklų kartotinių matavimų duomenys. Horizontaliųjų judesių monitoringas atliekamas vykdant trianguliacijos, trilateracijos, poligonometrijos ar globalinės padėties nustatymo sistemos (GPS) tinklų periodinius matavimus [13, 18, 31, 32, 38, 39, 42, 45, 46, 51, 52, 60, 62, 75, 78, 80, 92, 94, 97, 103, 124, 129, 130, 143, 145, 147, 156, 157, 158, 159, 167, 168, 171, 172, 175, 177, 208, 227].

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų tyrimas geodeziniais metodais betarpiškai susijęs su šiuolaikiniu judesių monitoringu, kuris yra geodinaminio monitoringo sudėtinė dalis [101, 139, 140, 167].

Iki paskutiniojo dvidešimto amžiaus dešimtmečio pagrindinis dėmesys dabartinių Žemės plutos judesių tyrimui buvo skiriamas seismiškai aktyviose teritorijose. Buvo laikoma, kad mažo seisminio aktyvumo platforminiuose regionuose tokie tyrimai turi tik mokslinę vertę, bet mažai aktualūs praktiškai. Tačiau išplitus sudėtingų, jautrių deformacijoms ir seisminiams reiškiniams padidinto ekologinio pavojingumo objektų (atominų elektrinių, didelių chemijos gamyklų ir kt.) statyboms bei kaupiantis seisminių reiškinių instrumentiniams stebėjimams, pasikeitė seisminio pavojingumo vertinimo platforminėse teritorijose kriterijai.

Istoriniai duomenys rodo, kad Lietuvoje ilgalaikės ramybės periodai yra sutrikdomi stiprių Žemės drebėjimų (netoli Ignalinos atominės elektrinės teritorijos yra buvę 13 Žemės drebėjimų, kai kurių intensyvumas siekęs 7 balus (pagal MSK–64 dvylikos balų skalę)) [84, 219].

Seisminiais tyrinėjimais Pabaltijo šalyse aktyviau pradėta domėtis po 1976 m. 6 balų intensyvumo Žemės drebėjimo Estijoje ir 1977 m. Užkarpatės Žemės drebėjimo [167, 219]. Šių Žemės drebėjimų rezonansiniai reiškiniai buvo juntami ir Lietuvoje. Po šių įvykių Pabaltijo teritorija jau nebuvo laikoma aseismiška. Tą akivaizdžiai patvirtina ir 2004 m. įvykęs Žemės drebėjimas Kaliningrado srityje, kurio virpesių bangos (viršijančios 5 balus) buvo juntamos ir Lietuvos teritorijoje.

Seismotektoninės analizės duomenimis Lietuvoje potencialių Žemės drebėjimų atsiradimų zonose galimi 7 balų intensyvumo Žemės drebėjimai [55, 166, 167, 206, 219].

Horizontaliosios Žemės plutos deformacijos ir jų savybės tam tikroje teritorijoje tiriamos analizuojant geodezinių tinklų koordinačių ar kitų elementų pokyčius, nustatytus atliekant

kartotinius geodezinius matavimus [5, 18, 21, 23, 34, 39, 72, 96, 113, 122, 132, 143, 148, 151, 152, 157, 159, 167, 168, 172, 174, 175, 177, 207]. Pagal šiuos duomenis galima apibūdinti horizontaliuosius Žemės plutos judesius, vykusius per laiko intervalą tarp kartotinių matavimų, nustatyti jų pobūdį. Kadangi geodezinių tinklų elementų pokyčiai yra susiję su tinklo punktų tarpusavio padėties pakitimais, tai pradiniai duomenys deformacijoms nustatyti gaunami apdorojant geodezinių tinklų matavimų rezultatus [128, 175, 186]. Šiems duomenims apdoroti skirtingu metu, skirtingais būdais ar skirtingose teritorijose sudarytiems geodeziniam tinklams susieti, susiejimo kokybei įvertinti yra specialūs moduliai plačiai paplitusiuose ir praktikoje naudojamuose geodezinių matavimų duomenų apdorojimo programiniuose paketuose.

Paprasčiausias horizontaliųjų Žemės plutos judesių nustatymo ir vaizdavimo būdas – pagal rezultatus, gautus geodezinių tinklų matavimų duomenis apdorojant įprastiniais metodais, palyginti identiškų punktų koordinates, apskaičiuotas remiantis skirtingu laiku atliktais geodeziniais matavimais, ir sudaryti vektorines punktų poslinkių schemas [209]. Tačiau toks horizontaliųjų Žemės plutos judesių nustatymo ir vaizdavimo būdas turi nemažai trūkumų, nes gautieji rezultatai priklauso nuo parinktų pradinių punktų bei krypčių, bus gaunami nevienareikšmiai rezultatai [167, 175]. Todėl horizontaliųjų Žemės plutos judesių nustatymo pagal geodezinių tinklų punktų koordinačių skirtumus būdas ir jų vaizdavimas vektorinėmis diagramomis Pasaulinėje praktikoje pradedamas keisti kitais įvertinimo būdais.

Pastaruoju metu plačiau paplito kiti horizontaliųjų Žemės plutos tyrimo pagal geodezinių matavimų rezultatus būdai, kurių teorinis pagrindas yra deformacijų tenzorių analizė [5, 8, 11, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 43, 66, 114, 116, 118, 122, 143, 151, 161, 167, 172, 174, 175, 177]. Tenzorių komponentėms ir deformacijų rodikliams įvertinti galima taikyti baigtinių elementų metodą [7, 14, 16, 28, 47, 53, 115, 167, 202].

Elementariausias baigtinis elementas – du geodezinio tinklo punktus jungianti styga. Tokio baigtinio elemento dilatacija bus stygos santykinis pailgėjimas [17, 167, 175].

Tiriant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas baigtiniu elementu gali būti priimtas trikampis, keturkampis ar kita blokinė struktūra (geometrinė figūra). Šiuo atveju baigtinio elemento horizontaliąsias deformacijas galima apibūdinti svarbiausiomis tikrosiomis santykinėmis deformacijomis (didžiausiuoju bei mažiausiuoju santykiniais pailgėjimais) bei jų kryptimis, baigtinio elemento dilatacija, deformacijomis pagal koordinačių ašis, poslinkio modulių ir baigtinio elemento posūkiu [72, 143, 152, 167, 175, 207]. Horizontaliosios deformacijos išreikštos santykiniais dydžiais (išskyrus posūkį) ir yra siejamos su baigtinio elemento svorio centru.

Sprendžiant deformacijų parametrų nustatymo uždavinį klasikiniu metodu, horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų analizė atliekama nustatant be galo mažų elementų nagrinėjamų savybių (deformacijų) santykinės reikšmės. Taria, kad elementai, kurių nustatytos horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų santykinės reikšmės, artėja į nulį, gaunamos integralinės arba diferencialinės lygtys su dalinėmis išvestinėmis, kuriomis aprašomos objekto deformacijos. Taikant baigtinių elementų metodą, daroma prielaida, kad pasirinktų riboto dydžio baigtinių elementų deformacijų pobūdis yra izotropinis. Todėl diferencialines lygtis su dalinėmis išvestinėmis galima pakeisti paprastomis diferencialinėmis lygtimis, o integravimo veiksmą – baigtiniu sumavimu.

Tenzorinė analizės metodika yra invariantiška koordinačių sistemų atžvilgiu, o kartu ir nepriklausanti nuo tvirtų punktų parinkimo. Šios metodikos taikymas, tiriant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas, leidžia vienareikšmiškai išspręsti svarbiausius geotektoninius uždavinius.

Tenzorinei horizontaliųjų deformacijų analizei atlikti reikalingos specialios kompiuterinės programos ir metodika [5, 32]. Todėl aktualu yra tiriant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas pagal specialias metodikas panaudoti daugiau duomenų, gautų taikant įprastines geodezinių tinklų matavimų rezultatų apdorojimo programas. Pirmieji tokie siūlymai pateikti [148] darbe. Tačiau jame nagrinėjama tik kaip nustatomi kai kurių deformacijų rodikliai, ir tyrimus būtina išplėsti, apimant daugiau uždavinių.

Tenzorinė horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų analizės metodika, įvertinant tenzorių komponentes ir deformacijų rodiklius baigtinių elementų metodu, taikyta [18, 37, 121, 132, 146, 167, 175, 207] ir kt. moksliniuose darbuose. Naudojant autorių siūlomus skaičiavimo būdus horizontaliosios Žemės plutos deformacijos nustatomos tik pavieniuose retai išsidėsčiusiuose taškuose, nes baigtinių elementų tinklas formuojamas remiantis tik geodezinio tinklo gruntiniais punktais. Kituose taškuose deformacijų reikšmės nustatomos atliekant geometrinį interpoliavimą, dažniausiai taikant tiesinio interpoliavimo procedūras. Toks horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymo būdas turi nemažai trūkumų – gaunamas retai išsidėsčiusių taškų tinklas, kuris tik bendrais bruožais atspindi Žemės plutoje vykstantį fizinį procesą. Nustatant horizontaliąsias deformacijas ne geodeziniuose punktuose geometriškai interpoliuojant yra neįvertinamos mechaninės bei struktūrinės deformuojamojo kūno savybės.

Pirmieji tokio pobūdžio moksliniai tyrimai Lietuvos teritorijoje atlikti [110, 167, 172, 174, 175, 177] darbuose. Horizontalieji Žemės plutos judesiai tirti naudojant Lietuvos nulinės klasės GPS tinklą bei netoli sienos Latvijos ribose esančius punktus Arājs ir Indra (Baltijos valstybių nulinės klasės GPS tinklo punktai sutampa su prieškarinės trianguliacijos punktais).

Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų sklaidą įvertinta naudojant 1926–1940 m. ir pirmaisiais pokario metais sudarytus pirmosios bei antrosios klasės trianguliacijos tinklus ir kosminės geodezijos metodais 1992–1994 m. sudarytą nulinės bei pirmosios klasės geodezinį GPS tinklą, naudoti 45 geodezinių tinklų bendrieji punktai. Horizontaliosios Žemės plutos deformacijos nagrinėtos pagal trianguliacijos ir GPS tinklų duomenis, t. y. pagal geodezinių tinklų koordinačių pokyčius. Tačiau gautųjų rezultatų interpretavimas ir palyginimas su Žemės plutos geologine bei geofizine sąranga atliktas tik vizualia euristine analize. Nėra atliktų tikslių matematinių statistinių skaičiavimų ir sudaryto statistiškai pagrįsto deformacijų sklaidos struktūrinio modelio, kuris leistų spręsti ne tik apie gautųjų rezultatų patikimumą, bet ir padėtų formuoti sisteminės analizės metodiką, sujungiant į vieną visumą technikos ir gamtos mokslų tyrimo metodikas bei metodus. Nėra atliktų tyrimų bei sudarytų skaičiavimo algoritmų, kuriais remiantis būtų galima įvertinti apibendrintųjų horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų sklaidą. Apibendrintųjų horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tyrimai pagal geodezinius matavimus leistų tiksliau ir detaliau atsižvelgti į tiriamojo regiono tektoninės sandaros ypatumus atliekant dabartinių geodinaminių procesų analizę.

Kai deformacijų interpoliavimas atliekamas nesutampančiuose su geodezinio tinklo punktais taškuose, tikslesnį bendrą deformacijų vaizdą būtų galima gauti taikant mechaninius deformacijų modelius [9, 14, 28, 53, 154, 202]. Derinant tenzorinės analizės būdą su mechaniniais struktūriniais fizinių kūnų deformacijų modeliais, galima gauti rezultatus, invariantiškus koordinačių sistemoms bei įvertinančius mechaninius deformuojamojo kūno dėsningumus.

Kitų šalių mokslininkai geodinaminiam procesams tirti pagal geodezinius, geofizinius bei geologinius duomenis siūlo taikyti, sudarant mechaninius struktūrinius fizinių kūnų deformacijų modelius bei įvertinant horizontaliųjų deformacijų kaitą mechanikoje modeliavimo uždaviniams spręsti plačiai naudojamu baigtinių elementų metodu universaliasias programas [47, 61, 77, 83, 85]. Tačiau Žemės plutos horizontaliųjų judesių modeliavimas pagal geodezinių matavimų duomenis nėra pakankamai išnagrinėtas.

Taip būtų gaunami detalūs Žemės plutos deformacijų bei jų kaitos duomenys, geriau atspindintys Žemės plutos deformacijų sąsajas su teritorijos tektonine sandara nei horizontaliųjų deformacijų reikšmės, apskaičiuotos tik taškuose, sutampančiuose su geodeziniais punktais. Lietuvoje tokių atliktų tyrimų nėra.

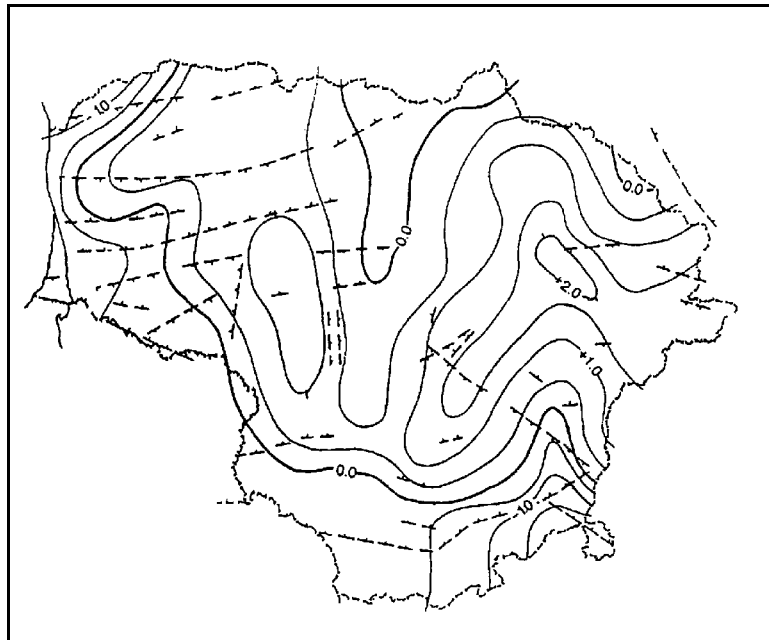
Nepakankamai ištirti sistemingųjų paklaidų įtakos Žemės plutos judesių rodiklių reikšmėms klausimai, t. y. sistemingųjų koordinačių paklaidų įtaka Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų tenzoriams ir svarbiausiems santykiniams deformacijų rodikliams, kai deformacijų rodikliai pagal geodezinius matavimus įvertinami baigtinių elementų metodu.

Šių tyrimų analizė, įvertinant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas bei deformacijų pokyčius tenzorinės analizės būdu, leistų nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų priklausomybę nuo sistemingųjų koordinatinių paklaidų.

Atliekant geodinaminių procesų kompleksinius tyrimus, neiškreipiant pagrindinės sisteminio požiūrio sampratos, būtina atsižvelgti į visas tarpusavyje susijusių rodiklių savybes ir šiuos požymius bei rodiklius interpretuoti kaip sudėtingų tarpusavio sąveikų sistemą [167, 169, 176, 179, 182]. Šiam tikslui pasiekti būtina panaudoti ir vertikalųjų judesių tyrimų duomenis, nes vertikalieji ir horizontalieji Žemės plutos judesiai yra tarpusavyje susiję, t. y. vertikalieji Žemės plutos judesiai gali turėti įtakos horizontaliesiems Žemės plutos judesiams, ir atvirkščiai.

Vertikalieji Žemės plutos judesiai Pabaltijo ir Lietuvos regionuose tirti [79, 141, 167, 168, 169, 172, 176, 178, 179, 182, 183, 197, 210, 216, 217, 221, 222, 229] bei kt. moksliniuose darbuose.

A. Zakarevičiaus [167, 168] monografijose pateikti tektoninio fono prognozės metodai. Atlikta šiuolaikinio tektoninio fono prognozė Lietuvos teritorijai pagal geodezinius ir geologinius duomenis. Sudarytas apibendrintas dabartinio tektoninio fono regresinis modelis Lietuvos teritorijai (1.1 pav.). Nustatyta, kad vertikalieji Žemės plutos judesiai Lietuvos teritorijoje yra dėsningas, su regioninėmis geologinėmis charakteristikomis susijęs gamtinis reiškiny.

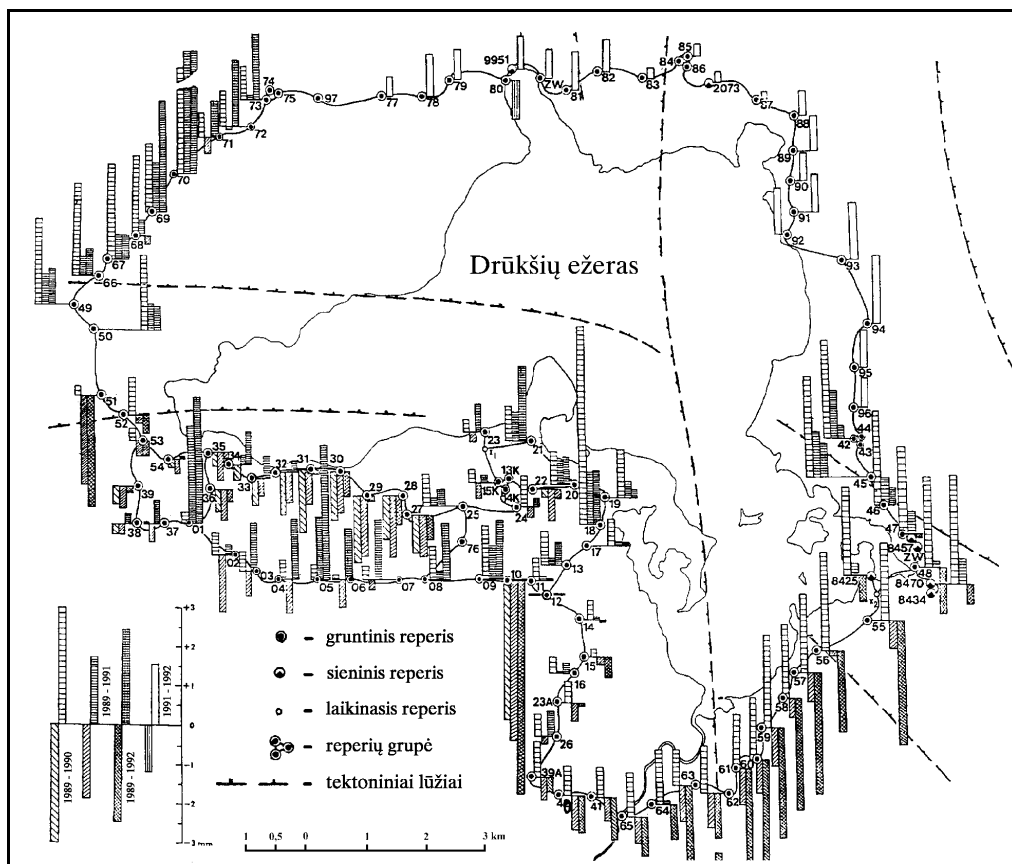


**1.1 pav.** Prognozuotas Lietuvos dabartinis tektoninis fonas  
(judesių greičiai mm per metus)

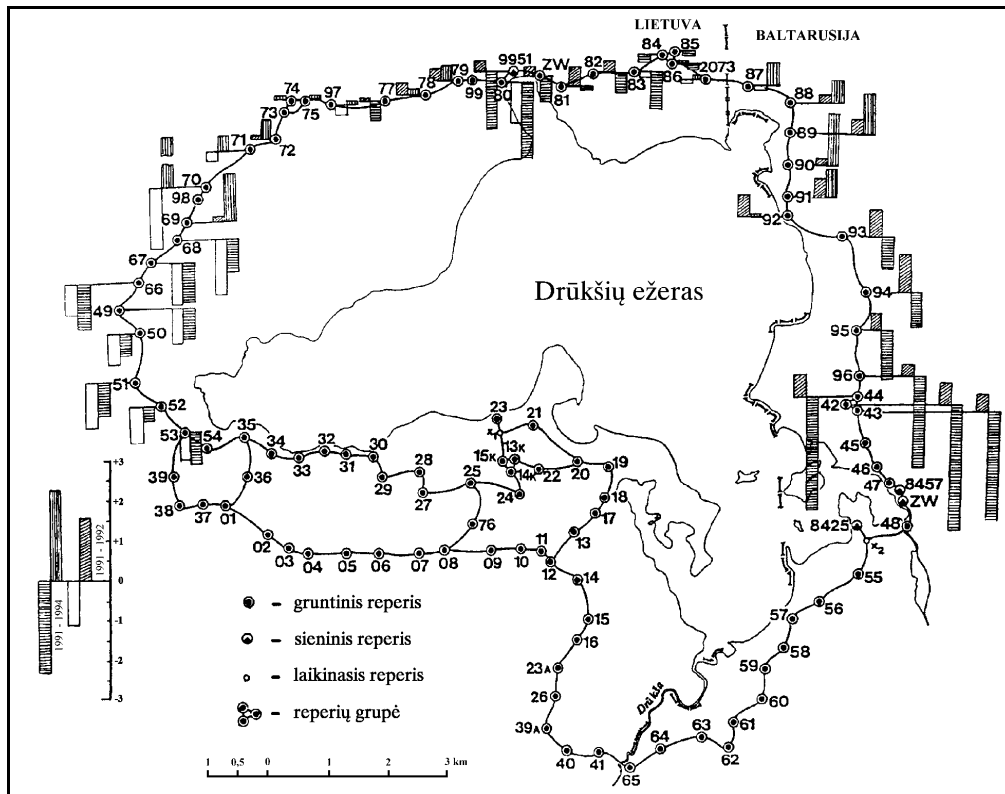
Šiuo metu sudaromas Lietuvos valstybinis geodezinis vertikalusis pirmosios klasės tinklas [105, 107, 109, 204], kuris atitiks tarptautinius reikalavimus ir naujų geodezijos technologijų bei mokslinių klausimų sprendimo reikmes. Vertikalojo tinklo punktų aukščiams nustatyti naudojami geodezijos, kosminės geodezijos ir gravimetrinių matavimų duomenys.

Detalūs bei tikslūs vertikalųjų judesių tyrimai pagal geodezinius matavimus Lietuvos teritorijoje atlikti Ignalinos atominės elektrinės rajone [2, 69, 110, 165, 166, 167, 168, 172, 180, 181, 185, 196]. Vertikaliesiems Žemės plutos judesiams Ignalinos atominės elektrinės rajone tirti 1989 metais įrengtas specialus poligonas, kurį sudaro precizinės niveliacijos tinklas [2, 167, 172]. Bendras poligono niveliacijos tinklo perimetras 66 km. Tiksliosios niveliacijos poligone atliktos 1989, 1990, 1991, 1992 ir 1994 metais (1.2 ir 1.3 pav.) [2, 166, 167, 168, 172, 180, 181].

Niveliacijos ėjimų trasos parinktos, atsižvelgiant į matavimų galimybes ir tektoninių lūžių išsidėstymą. Niveliacijos tinkle yra 114 reperijų. Gruntiniai reperiai įgilinti 4 metrus, gelminiai reperiai – 10 metrų. Visi matavimai atlikti tuo pačiu prietaisų komplektu, naudotas kompensacinis precizinis nivelyras Ni 002 ir brūkšninės invarinės matuoklės.



**1.2 pav.** Vertikalieji Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje



**1.3 pav.** Vertikalieji Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono šiaurinėje dalyje

Vertikalieji Žemės plutos judesiai įvertinti išlyginant aukščių skirtumų tarp reperių pasikeitimus, gautus pagal skirtingu laiku atliktus matavimus [166, 167, 168].

Pagal matavimų rezultatus nustatyta, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės rajone yra blokinės struktūros. Išskirti du blokai, kurie susiję su svarbiausiais kristalinio pamato lūžiais. Į du atskirus blokus vertikalūs Žemės paviršiaus judesiai pasiskirsto pagal beveik paralelės kryptimi einantį ir rytinėje poligono dalyje į pietryčius pasukantį kristalinio pamato Drūkšų lūžį. Šiaurinio ir pietinio blokų tarpusavio vertikalaus persistūmimo amplitudė per trejus metus vidutiniškai yra apie 5–6 mm [166]. Šiaurinis blokas kyla pietinio atžvilgiu. Tarp šiaurinio ir pietinio blokų nustatytas pereinamasis blokas, esantis į pietvakarius nuo meridiano ir paralelės kryptimi einančių lūžių susikirtimo. Pietvakarinėje dalyje pastebima vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių krypties inversija. Pietrytinėje poligono dalyje nustatytas judesių krypties pokytis. Didžiausias dabartinis tektoninis aktyvumas nustatytas Drūkšų grabeno lūžių zonoje.

Žemės plutos judesių identifikavimo patikimumas patikrintas matematiniais statistiniais metodais, t. y. taikyti dispersinės, koreliacinės, kumuliatyviųjų sumų analizės, adaptyvinio eksponentinio prognozavimo metodai [165, 167, 168].

Nustatyta, kad vertikaliųjų Žemės plutos judesių modelio svarbiausių elementų ribų linijos susijusios su kristalinio pamato lūžių linijomis ir tektoninėmis struktūromis.

Gauti mokslinių tyrimų rezultatai rodo, kad Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės poligono teritorijoje yra diferencijuoti pagal svarbiausius kristalinio pamato lūžius, ribojančius žemesnės eilės tektonines struktūras.

## **1.2. ŽEMĖS PLUTOS TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ TYRIMŲ GEODEZINIAIS METODAIS APŽVALGA**

Vienas iš seisminio monitoringo ir teritorijos geodinaminės rizikos įvertinimo elementų yra dabartinių Žemės plutos įtempių kaitos tyrimas pagal geodezinių matavimų rezultatus.

Pagal mechanikos dėsnius Žemės plutos judesiai susiję su jos įtempių kaita. Todėl tarp Žemės plutos judesių ir tektoninių įtempių yra funkcinis ryšys [34, 47, 59, 164, 211, 223, 231].

Tiriant Žemės plutos judesius, daugeliu atveju, nustatomos svarbiausių santykinų deformacijų kryptys ir remiantis gautais rezultatais yra interpretuojami tektoninių įtempių laukų dėsningumai [167, 175, 214], nes svarbiausių horizontaliųjų deformacijų ir svarbiausių tektoninių įtempių kryptys yra tapačios. Tačiau, taip nustatytas tektoninių įtempių pasiskirstymo fonas atspindi tik bendrąsias dabartinių Žemės plutos judesių savybes. Norint gauti detalesnę ir tikslesnę informaciją apie dabartinį tektoninių struktūrų aktyvumą, reikia nustatyti apibrėžtas Žemės plutos tektoninių įtempių kitimo tendencijas, t. y. tektoninių įtempių pokyčius. Tai leistų tiksliau interpretuoti geotektoninių procesų raidą, nes gautieji tyrimo rezultatai – Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčiai, bus išreikšti ne santykinu dydžiu, kaip horizontaliosios deformacijos, o jėgos vienetais, tenkančiais ploto vienetui [9, 155].

Tačiau Žemės plutos judesius siekiant nustatyti tiesiogiai – sulyginant per skirtingus matavimų ciklus gautas koordinates, galimas rezultatų nevienareikšmiškumas [167, 175]. Dėl tos priežasties pagal geodezinių punktų poslinkius apskaičiuotų Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčiai taip pat bus nevienareikšmiai.

Todėl pagal geodezinių matavimų rezultatus skaičiuojant Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčius reikia taikyti koordinačių sistemų atžvilgiu invariantiškus, t. y. nuo pradinių taškų pasirinkimo, skaičiuojant geodezinių punktų poslinkius, nepriklausančius analizės metodus. Vienas iš tokių būdų yra tenzorinė plokštuminių įtempių analizė [7, 9, 23, 50, 64, 70, 76, 95, 153, 164, 202, 220, 223, 228, 231, 232, 233].

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtempių sąsajoms aprašyti analogiškai kaip ir mechanikoje gali būti pritaikytas atvirkštinis Huko fizinis dėsnis [7, 9, 28,

59, 115, 153, 164, 202, 220, 228, 231]. Tai leistų nustatyti Žemės plutos tektoninių įtempių laukų charakteristikas, t. y. normalinių ir tangentinių tektoninių įtempių pokyčius, svarbiausių tektoninių įtempių pokyčius bei įvertinti jų krypčių sklaidą.

Kadangi dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ilgą periodą vykstančių tektoninių Žemės plutos deformacijų tąsa, tai geodeziniais metodais nustatytos horizontaliosios deformacijos yra ilgo periodo deformacijų pokytis per tam tikrą laikotarpį. Dėl šios priežasties pagal geodezinių matavimų rezultatus, atsižvelgiant į sąsajas tarp horizontaliųjų deformacijų ir tektoninių įtempių, galima būtų apskaičiuoti įtempių pokyčius, o ne absoliučiąsias įtempių reikšmes. Tačiau tektoninių įtempių pokyčiams įvertinti reikalinga parengti teoriškai pagrįstą metodiką.

Dabartinių geodinaminių procesų tyrimai, įvertinant Žemės plutos tektoninių įtempių kaitą, nagrinėti kitų šalių autorių [12, 13, 23, 31, 48, 49, 50, 61, 62, 67, 76, 85, 93, 95, 112, 124, 200, 201, 203, 231] moksliniuose darbuose. Lietuvoje tokie moksliniai tyrimai nebuvo atliekami.

Tačiau mokslinės publikacijos, kuriose būtų nagrinėtas universaliųjų ir specialiųjų programų (*ABAQUS*, *ADELI*, *ALGOR*, *ANSYS*, *CATIA*, *COSMOS*, *DIANA*, *MARC* ir kt.) taikymas Žemės plutos tektoninių įtempių kaitai modeliuoti pagal geodezinių matavimų duomenis yra retos. Taip pat nėra pakankamos informacijos apie tektoninių įtempių pokyčių, apskaičiuotų pagal geodezinius matavimus, kaitos sąsajas su Žemės plutos geologine sandara.

Nustatytų Žemės plutos tektoninių įtempių pasiskirstymo dėsningumą palyginimas su Žemės plutos geologine sandara leistų spręsti ne tik apie gautų rezultatų patikimumą, bet ir leistų atlikti kompleksinę Žemės plutos judesių analizę, o baigtinių elementų metodo pagrindu sukurtų programų taikymas leistų detalizuoti Žemės plutos tektoninių įtempių kaitą. Taip atliekant mokslinius tyrimus būtų galima daug patikimiau prognozuoti dabartinius geodinaminius procesus bei objektyviau vertinti geodinaminio monitoringo tyrimų rezultatus.

### 1.3. IŠVADOS

1. Tiriant horizontaliuosius Žemės plutos judesius bei dabartinius geodinaminius procesus pagal geodezinių matavimų duomenis rekomenduojama taikyti tenzorinės analizės principais pagrįstus metodus, kurie yra invariantiški koordinačių sistemoms. Taikant šiuos metodus galima panaudoti skirtingose koordinačių sistemose sudarytus geodezinius tinklus.

2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei tektoninių įtempių kaitos modeliavimas pagal geodezinių matavimų duomenis, taikant universaliąsias programas, pagreitins mokslinių tyrimų analizės procesus bei leis gauti išsamias Žemės plutos judesių charakteristikas. Tačiau

šios programos dažniausiai taikomos inžinerinių konstrukcijų skaičiavimui. Žemės plutos judesių tyrimai turi specifinių ypatumų, todėl universaliųjų programų sėkmingam taikymui geodinaminiams uždaviniams spręsti reikalingi tyrimai, nes nėra išsamesnės programų taikymo šios rūšies uždaviniams spręsti analizės.

3. Pagal apskaičiuotus Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčių duomenis, galima tiksliau ir detaliau interpretuoti Žemės plutoje vykstančius geodinaminius procesus.

4. Reikalinga teoriškai pagrįsta metodika, kuria remiantis pagal geodezinių matavimų duomenis būtų galima įvertinti Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčius.

5. Įvertintos Žemės plutos judesių charakteristikos negali būti interpretuojamos atsietai nuo konkrečiam regionui būdingų geologinių, geomorfologinių bei geofizinių savybių, t. y. turi būti atliekama kompleksiška dabartinių geodinaminių procesų raidos analizė.

## **2. LIETUVOS TERITORIJOS TEKTONINĖ SANDARA IR GEODEZINIŲ TINKLŲ ŽEMĖS PLUTOS JUDESIAMS TIRTI NAUDOJIMO GALIMYBĖS**

Žemės plutos judesiai skirstomi [40, 135] į senuosius tektoninius judesius ir neotektoninius judesius, apimančius neogeno ir kvartero periodus. Neotektoniniai judesiai yra trumpesnio periodo nei senieji judesiai svyruojančiųjų osciliacijų suminis rezultatas. Dabartiniai judesiai yra dar mažesnio periodo Žemės plutos pulsacijos, pasireiškiančios ribotose teritorijose, kintančios krypties ir nepastovaus greičio. Dabartiniams judesiams priskiriamas paskutiniųjų 150 metų laikotarpis, kai Žemės plutos judesiams nustatyti buvo pradėti naudoti tikslieji geodeziniai matavimai.

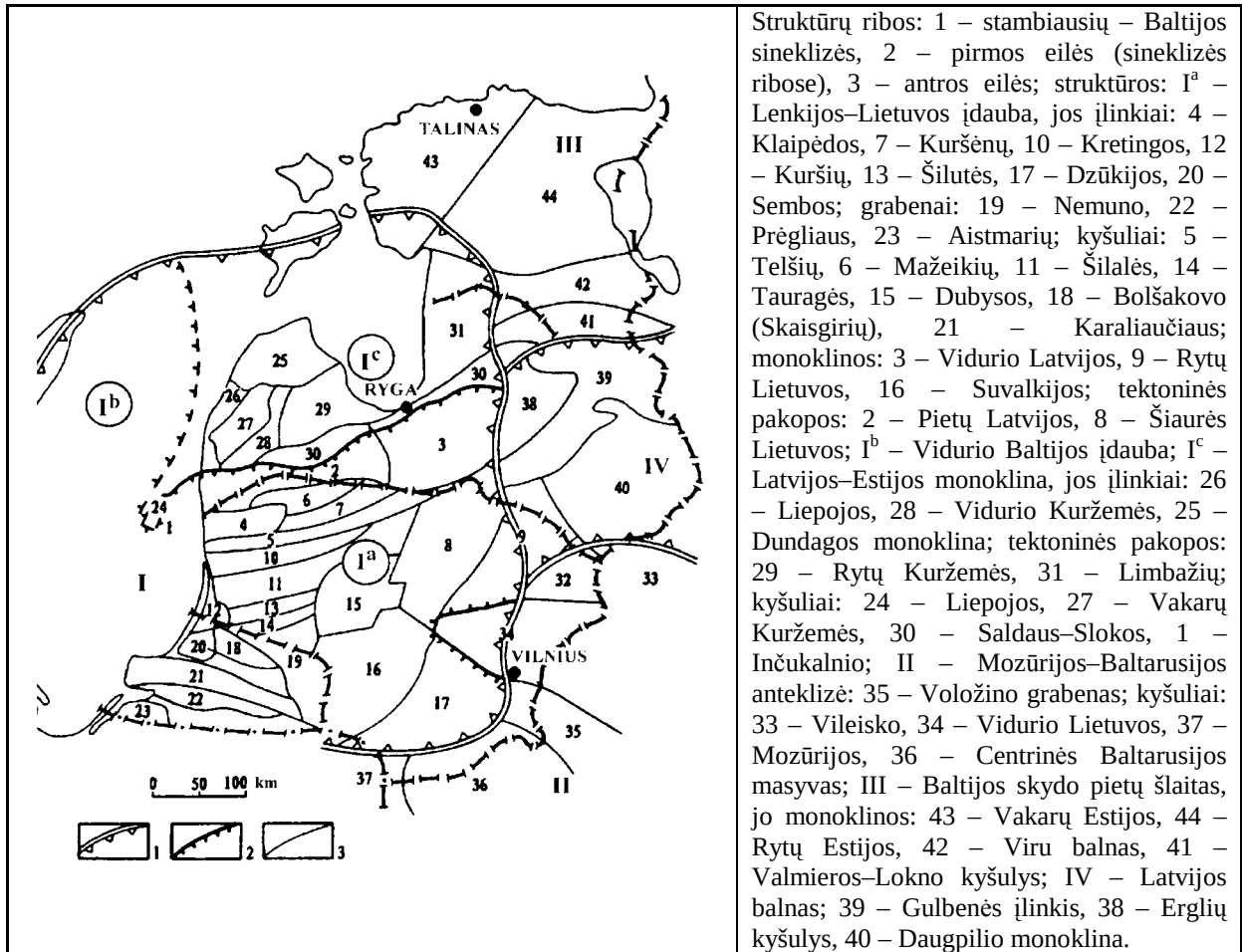
Senieji tektoniniai ir neotektoniniai judesiai atspindi Žemės plutos geologinėse struktūrose, nuosėdinių uolienų storymėse, susiję su Žemės plutos kristalinio pamato lūžiais. Dabartiniai Žemės plutos judesiai yra natūralus neotektoninių judesių tęsinys. Lokalių teritorijų tektoniniai Žemės plutos judesiai pasireiškia regioninių judesių fone ir juos sieja tektoninė Žemės plutos sandara, regioninės ir lokalsios tektoninės struktūros, įvairaus rango tektoniniai lūžiai.

Dėl šių priežasčių, prieš pradedant detalų Žemės plutos horizontaliųjų judesių tyrimą Ignalinos atominės elektrinės rajone, kur tyrimams įrengtas specialus geodinaminis poligonas, pirmiausiai nagrinėjamas dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos judesių regioninis fonas Lietuvos teritorijoje. Nustatoma judesių regioninė sklaida ir jų sąsajos su regioninėmis geologinėmis savybėmis ir struktūromis. Po to pereinama prie lokalsios teritorijos tyrinėjimų, ne tik regioninių, bet ir lokalių tektoninių lūžių dabartinio aktyvumo judesių sąsajų su lokalinėmis tektoninėmis struktūromis analizės. Tokiu principu atliekant tyrimą, nustatomos lokalių teritorijų Žemės plutos judesių charakteristikos regioninių labiau apibendrintų judesių fone. Regioniniai judesiai nustatomi labiau apibendrinti, nes jų nustatymui naudojamas žymiai retesnis geodezinių punktų tinklas, o pakartoti matavimai atlikti su didesniu laikotarpiu. Lokalius judesius sieti su regioniniu fonu būtina ir dėl kitų priežasčių. Visas Žemės paviršius nestabilus ir dėl to absoliučių lokalių judesių reikšmių nustatyti negalima.

### **2.1. LIETUVOS TERITORIJOS TEKTONINĖS SANDAROS YPATUMAI**

Geologinio rajonavimo schemas gali būti labai įvairios. Prekambrinių platformų srityse siūloma naudoti kristalinio pamato struktūrinio–tektoninio rajonavimo schemomis [40, 44, 135]. Struktūriniai–tektoniniai regionai yra stambios, I eilės geologinės struktūros. Jų visoje Rytų Pabaltijo teritorijoje išskiriama penkios (2.1 pav.) [135, 234]: Mozūrijos–Baltarusijos

anteklizė, Baltijos sineklizė, tarp jų Lietuvos–Baltarusijos šlaitas, Latvijos balnas, Baltijos skydas. Pirmos keturios struktūros apima Lietuvos teritoriją.



**2.1 pav.** Pabaltijo tektoninio rajonavimo schema (pagal P. Suveizdį, A. Brangulį ir V. Pūrą)

Svarbiausia yra superregioninė Suvalkų–Dzūkijos tektoninių lūžių zona, skirianti dvi stambiausias Pabaltijo struktūras – Baltijos sineklizę nuo Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės [136, 234]. Ši zona eina beveik platumos kryptimi, į šiaurę nuo Druskininkų, toliau atsekama šiaurės rytų Lenkijoje. Zoną sudaro du pagrindiniai sprūdiniai Suvalkų ir Dzūkijos lūžiai [40, 135], kurių kiekvienas turi lokalių sprūdžių, daugiausia šiaurės rytų krypties.

Kita regioninių tektoninių lūžių zona išskirta Nemuno žemupyje [135]. Sausumoje, iki Nemuno žiočių jos ilgis yra apie 75 km, toliau Kuršių mariose ji šakojasi į dvi dalis – iš pietų pusės eina Kuršių sprūdis, nusitęsiantis į Baltijos jūrą. Visi minėti lūžiai yra beveik platumos krypties.

Vakarinėje Lietuvos dalyje išsiskiria Telšių ir Pietų Šilalės platumos krypties tektoninės lūžių zonos [40, 135], abi turinčios nusprūdusius pietinius sparnus.

Pietrytinėje Lietuvos dalyje išskirta regioninė Vilniaus–Ašmenos lūžių zona [135]. Ji tęsiasi iš pietryčių į šiaurės vakarus ir sutampa su Neries žemupiu. Joje išskirti du pagrindiniai sprūdžiai – Vilniaus ir Ašmenos.

Labai stambi Rytų Europos platformos struktūra – Baltijos sineklizė [40, 135, 136, 137, 219, 234]. Ją riboja kitos stambios tektoninės struktūros: pietuose ir pietryčiuose – Mozūrijos–Baltarusijos anteklizė, rytuose – Latvijos balnas, šiaurėje ir vakaruose ji remiasi į Baltijos skydo šlaitą, pietvakariuose atsiveria į giliai nugrimzdusį Danijos–Lenkijos įlinkį. Visoje sineklizės teritorijoje yra tektoninių lūžių, išryškėjusių ne tik kristaliniame pamate, bet ir įvairiuose nuosėdinės dangos lygiuose.

Baltijos sineklizę sudaro trys pagrindinės struktūros – Lietuvos–Lenkijos ir Vidurio Baltijos įdaubos bei šiaurės rytinė Latvijos–Estijos monoklina (2.1 pav.). Lietuvos–Lenkijos įdaubą pietuose ir rytuose riboja Mozūrijos–Baltarusijos anteklizė, vakaruose – Vidurio Baltijos įdauba ir šiaurėje – Liepojos–Rygos pakelta regioninių tektoninių lūžių zona.

Šiaurės vakarinėje dalyje yra Klaipėdos įlinkis (2.1 pav.).

Telšių kyšulys yra platuminės krypties struktūra [40], esanti tarp Klaipėdos ir Kretingos įlinkių.

Mažeikių kyšulys užima šiaurinį vakarinės Lietuvos dalies pakraštį, kur jį iš pietų riboja Klaipėdos įlinkis, o iš šiaurės – Pietų Latvijos tektoninė pakopa.

Kuršėnų įlinkis šiaurės Lietuvoje ribojamas dviejų beveik platumos krypties tektoninių lūžių zonų.

Šiaurės Lietuvos tektoninė pakopa susijusi su toliau į rytus išskiriama Rytų Lietuvos monoklina, o šiaurėje esantis platumos krypties Bauskos tektoninis lūžis riboja ją nuo toliau išplitusios Vidurio Latvijos monoklinos [40, 135].

Rytų Lietuvos monoklina (2.1 pav.) yra pačiame rytiniame Lietuvos–Lenkijos įdaubos pakraštyje, ties riba su Mozūrijos–Baltarusijos anteklize. Ją riboja Zarasų ir Šiaurės Lietuvos tektoninės pakopos.

Kretingos įlinkis išskiriamas vakarų Lietuvoje, į pietus nuo Telšių kyšulio. Iš pietų pusės šią struktūrą riboja Šilalės kyšulys ir jam statmena Gargždų lūžių zona.

Šilalės kyšulys sudėtingiausias iš visų aprašytųjų [135], nes jį vakarinėje dalyje stačiu kampu kerta Gargždų lūžių zona su lokaliomis struktūromis – Šiuparių, Pietų Šiuparių, Vilkyčių ir kt.

Kuršių įlinkis yra Kuršių mariose (įlinkis mažai ištirtas, ribos neaiškios).

Šilutės įlinkį riboja Šilalės ir Tauragės kyšuliai.

Tauragės kyšulys iš pietryčių ir pietvakarių pusės apribotas tektoninių lūžių, sudarančių Nemuno grabeną.

Dubysos kyšulys iš pietryčių ir pietvakarių pusės ribojamas tektoninių lūžių ir Nemuno grabeno.

Suvalkijos monoklina yra pietų Lietuvoje ir išsiskiria kaip lėkštas kristalinio pamato paviršiaus plotas [40, 135].

Dzūkijos įlinkis yra pietryčių Lietuvoje (2.1 pav.). Jis susisiečia su Mozūrijos–Baltarusijos anteklize ir joje išsiskiriančiu Voložino grabenu [135], vakaruose prieina prie Suvalkijos monoklinos, o iš šiaurės ir rytų įlinkį nuo toliau į šiaurę esančio Vidurio Lietuvos kyšulio riboja Vilniaus regioninis tektoninis lūžis.

Vidurio Baltijos įdauba išskiriama Baltijos jūroje, lygiagrečiai Lietuvos ir Latvijos pakrantei.

Šiaurės rytų (Latvijos–Estijos) monoklina užima Kuržemę, Rygos įlanką ir dalį pietinės Estijos. Jos kristalinio pamato paviršius pasviręs pietvakarių link, suskaldytas tektoninių lūžių. Stambiausia – Liepojos–Rygos – tektoninių lūžių zona tęsiasi iš vakarų į rytus [40, 234].

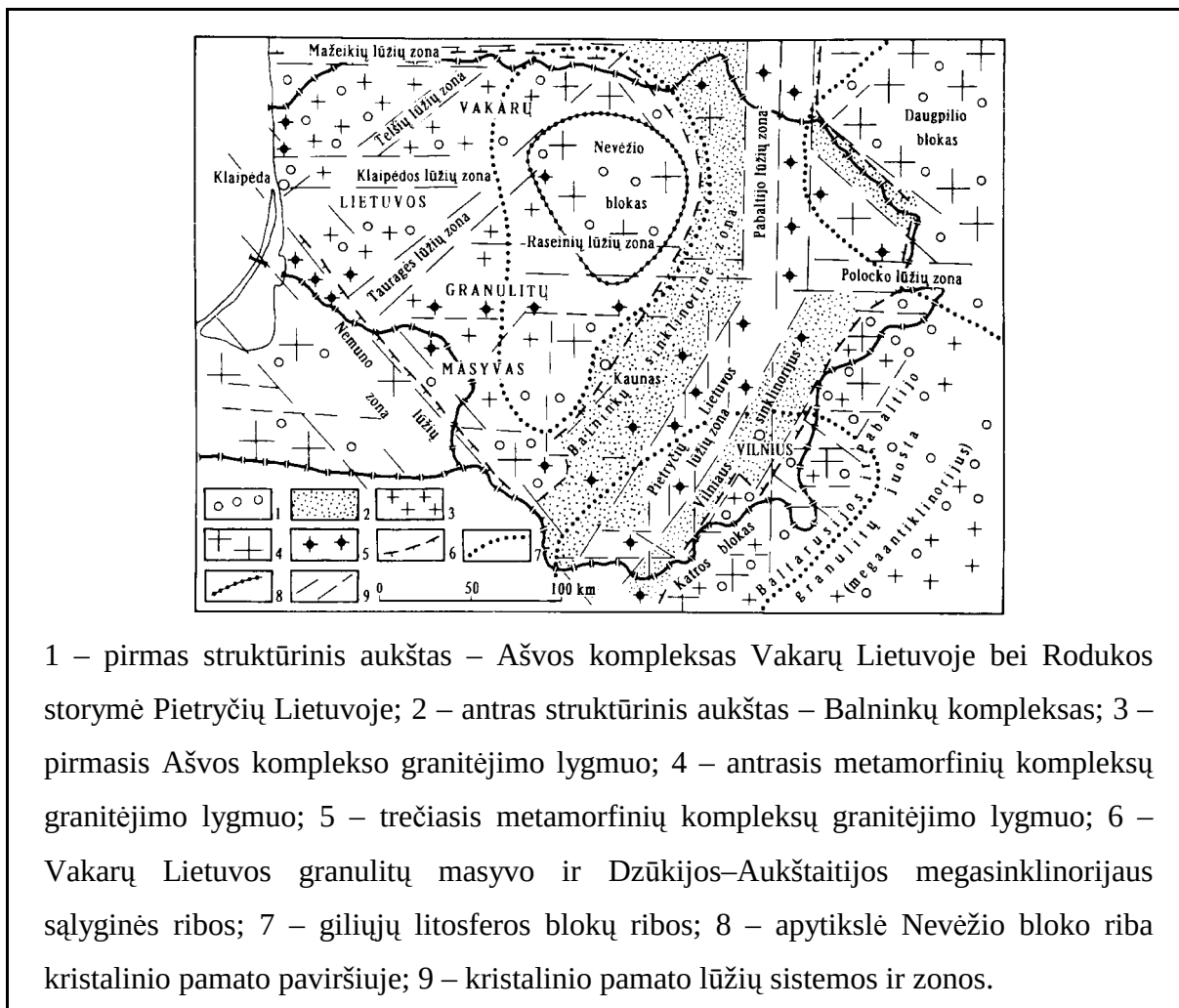
Rytų Lietuvoje Mozūrijos–Baltarusijos anteklizėje išskiriamos dvi subregioninio rango tektoninės struktūros – Vidurio Lietuvos kyšulys ir Zarasų tektoninė pakopa.

Zarasų tektoninė pakopa užima rytinę Lietuvos dalį.

Į šiaurės rytus nuo Lietuvos teritorijos plyti stambi tektoninė struktūra – Latvijos balnas [234]. Iš šiaurės ją riboja Rygos–Pskovo tektoninių lūžių zona, o iš pietų – Mozūrijos–Baltarusijos anteklizė. Išskiriama keletas mažesnių tektoninių struktūrų: Gulbenės įlinkis, Erglių pakiluma, Daugpilio monoklina. Už Latvijos balno visa teritorija priskiriama Baltijos skydo pietiniam šlaitui.

Analizuojant Lietuvos kristalinio pamato tektoninę struktūrą, išryškėja dvi skirtingos sritys – vakarų ir rytų (2.2. pav.) [40, 91, 137]. Vakarinę užima Vakarų Lietuvos granulitų masyvas. Jį sudaro pirmojo tektoninio aukšto uolienos ir trečiojo bei ketvirtojo aukštų storymių fragmentai. Šiaurinėje ir pietinėje masyvo dalyse slūgso erlėnų, o tarp jų – pocių serijos gneisai bei skalūnai. Rytinė granulitų masyvo dalis labai granitizuota ir sudaro Nevėžio giluminį bloką. Iš šiaurės masyvą riboja platuminės krypties Mažeikių lūžių sistema. Pietinę struktūros dalį kerta giluminė lūžių zona. Rytinėje Lietuvos dalyje iš šiaurės į pietvakarius tęsiasi sudėtingos sandaros Dzūkijos–Aukštaitijos kristalinio pamato struktūra, kuri susideda iš antrojo tektoninio aukšto, arba balninkų komplekso, uolienų. Į šiaurę ji tęsiasi Latvijos Inčiukalnio struktūrinės zonos link. Iš šiaurės rytų šią struktūrą riboja giluminis Daugpilio blokas, analogiškas vidurio Lietuvoje esančiam Nevėžio blokui. Rytų kryptimi iškyla Baltarusijos ir Pabaltijo granulitų juosta. Vakaruose Dzūkijos–Aukštaitijos struktūra šliejasi prie Vakarų Lietuvos granulitų masyvo granitizuoto Nevėžio bloko. Pietinėje dalyje ji

remiasi į giluminį Katros bloką, kuris yra minėtosios granulitų juostos dalis. Struktūros išilginę ašį sudaro dvi lūžių sistemos: šiaurinėje dalyje – Pabaltijo, pietinėje – pietryčių Lietuvos. Ją skersai kerta Polocko ir Raseinių lūžių sistemos. Lūžių, ypač išilginių, zonos uolienos intensyviai granitizuotos ir metasomatiškai pakitusios.

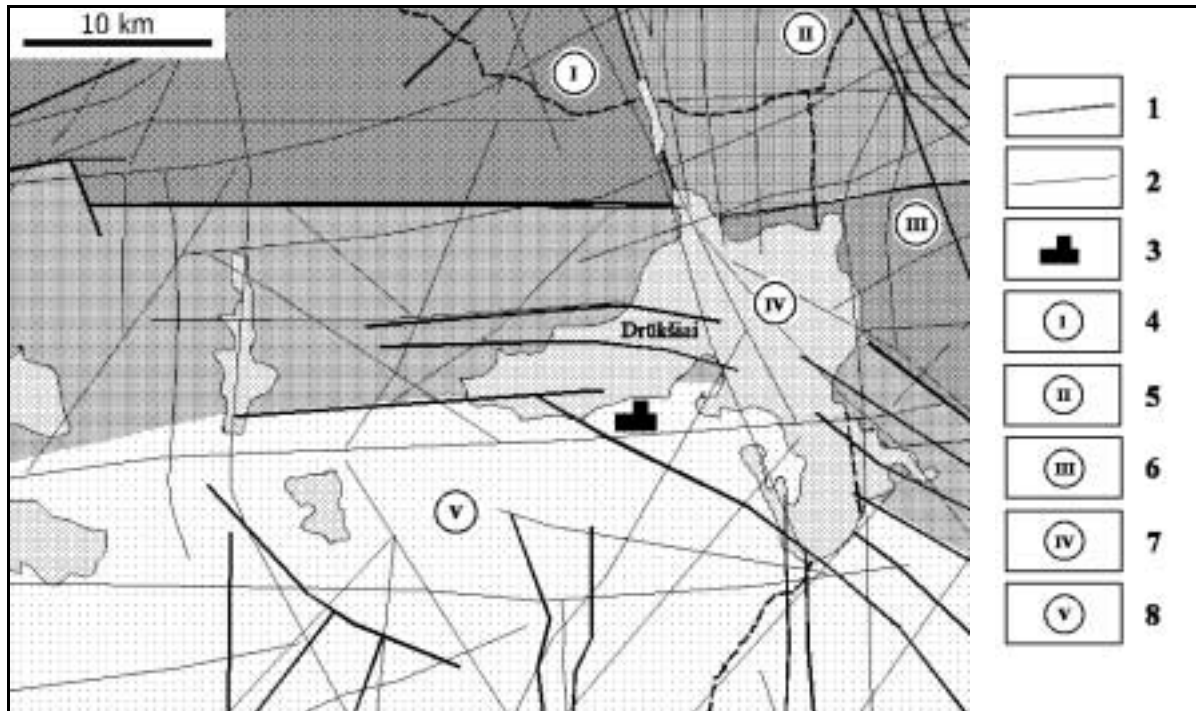


**2.2 pav.** Lietuvos kristalinio pamato struktūrinė–tektoninė schema [40]

## *Ignalinos atominės elektrinės rajono tektoninės sąlygos*

Parentkant Ignalinos atominės elektrinės statybos vietą, nepakankamai įvertinta teritorijos ekogeodinaminė rizika [219]. Ignalinos atominė elektrinė yra pastatyta trijų stambių tektoninių struktūrų (2.1 pav): Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės, Baltijos sineklizės ir Latvijos balno sandūros zonoje [84, 234]. Šioje teritorijoje yra trijų didelių kristalinio pamato lūžių zonų (Pietryčių Lietuvos, Pabaltijo, Polocko) sankirta. Todėl šio regiono geologinė raida

ir tektonika sudėtinga. Pagal kristalinio pamato paviršiaus reljefą čia išskiriamos žemesnės eilės tektoninės struktūros (blokai): šiaurės Zarasų pakopa, rytų Drūkšių pakiluma, Anisimovičių grabenas, Drūkšių grabenas ir pietų Drūkšių pakiluma (2.3 pav.) [84, 135].



**2.3 pav.** Drūkšių struktūrinio rajono tektoninė schema (pagal S. Šliaupą): 1 – tektoniniai lūžiai, 2 – neotektoninis lineamentas, 3 – Ignalinos atominė elektrinė; tektoninės struktūros: 4 – šiaurės Zarasų pakopa, 5 – Anisimovičių grabenas, 6 – rytų Drūkšių pakiluma, 7 – Drūkšių grabenas, 8 – pietų Drūkšių pakiluma

Šiaurės Zarasų pakopa yra šiaurinėje rajono teritorijoje. Iš pietų ją riboja Zarasų lūžis. Skirno lūžis šiaurės Zarasų pakopą dalija į vakarinę ir rytinę dalis.

Iš pietų Anisimovičių grabeną riboja Zarasų lūžis, o nuo Zarasų pakopos rytinio bloko jį skiria Anisimovičių lūžis (kristalinio pamato paviršius yra daugiau nei 750–800 m gylyje).

Drūkšių grabenas – tai lanko pavidalo juosta minėtų regioninių struktūrų sandūros zonoje, besitęsianti per Drūkšių ežerą iš vakarų į pietryčius ir siekianti elektrinės statinio teritoriją. Jos plotis – 3–5 km. Tai sudėtinga grabeno – horsto – grabeno tipo struktūra, sudaryta iš trijų 0,5–1,5 km pločio juostų. Iš šiaurės ir šiaurės rytų grabeną riboja Zarasų ir Stankovičių lūžiai, iš pietų ir pietryčių – Visagino ir Obolės lūžiai. Vidutinė grabeno dalis iškilusi ir sudaro horstą. Horstą ribojančių lūžių amplitudės yra 25–55 m, o įlinkį iš šiaurės ir pietų ribojančių lūžių amplitudės – 10–20 m.

Rytų Drūkšių pakiluma yra rytinėje rajono dalyje. Iš pietvakarių ją riboja Stankovičių, o iš šiaurės – Zarasų lūžiai. Kristalinis pamatas labai suskaldytas šiaurės vakarų ir šiaurės rytų krypties lūžių.

Pietų Drūkšių pakiluma yra pietinėje rajono dalyje. Šiaurėje ir šiaurės rytuose nuo Drūkšių grabeno ją skiria Visagino ir Obolės lūžiai, o pietuose – Polocko lūžis. Pakilumą kerta keli submeridianinės šiaurės vakarų ir šiaurės rytų krypties lūžiai, kai kur atskiriantys neplačias ir nedidelės amplitudės grabeno tipo struktūras.

Kristalinis pamatas suskilęs nevienodo dydžio blokais. Įvairaus rango lūžių susikirtimo mazgas – ties Drūkšių ežeru. Lūžiai yra ikiplatforminiai (nekertantys nuosėdinės dangos) ir platforminiai (kertantys nuosėdinę dangą). Tai rodo, kad teritorija įvairiais geologiniais laikotarpiais buvo tektoniškai aktyvi. Ikiplatforminiai lūžiai riboja įvairaus intensyvumo gravitacinius ir magnetinius laukus, atspindinčius skirtingą kristalinio pamato blokų medžiaginę sudėtį ir struktūrą. Dauguma jų buvo aktyvūs formuojantis nuosėdinei dangai baikaliniu, kaledoniniu, hercininiu ir alpiniu etapais [84]. Labiausiai lūžių suskaldyta rytinė tiriamojo rajono dalis [134].

Šiam regionui būdingos ir labai ryškios magnetinio lauko anomalijos: fiksuotas Drūkšių  $\Delta T$  anomalijų plotas, jame itin išsiskiria grandinė anomalijų, kurių maksimalioji reikšmė – 1350 nT [135].

Pagal morfometrines ir morfostruktūrines analizės bei kosminių nuotraukų dešifravimo duomenis, dauguma kristalinio pamato lūžių, kertančių nuosėdinę dangą, yra neotektoniškai aktyvūs [84, 236].

Dabartinių lūžių aktyvumą patvirtina vertikaliųjų Žemės plutos judesių matavimai aplink Drūkšių ežerą įrengtame poligone [2, 166, 167, 168, 180, 181].

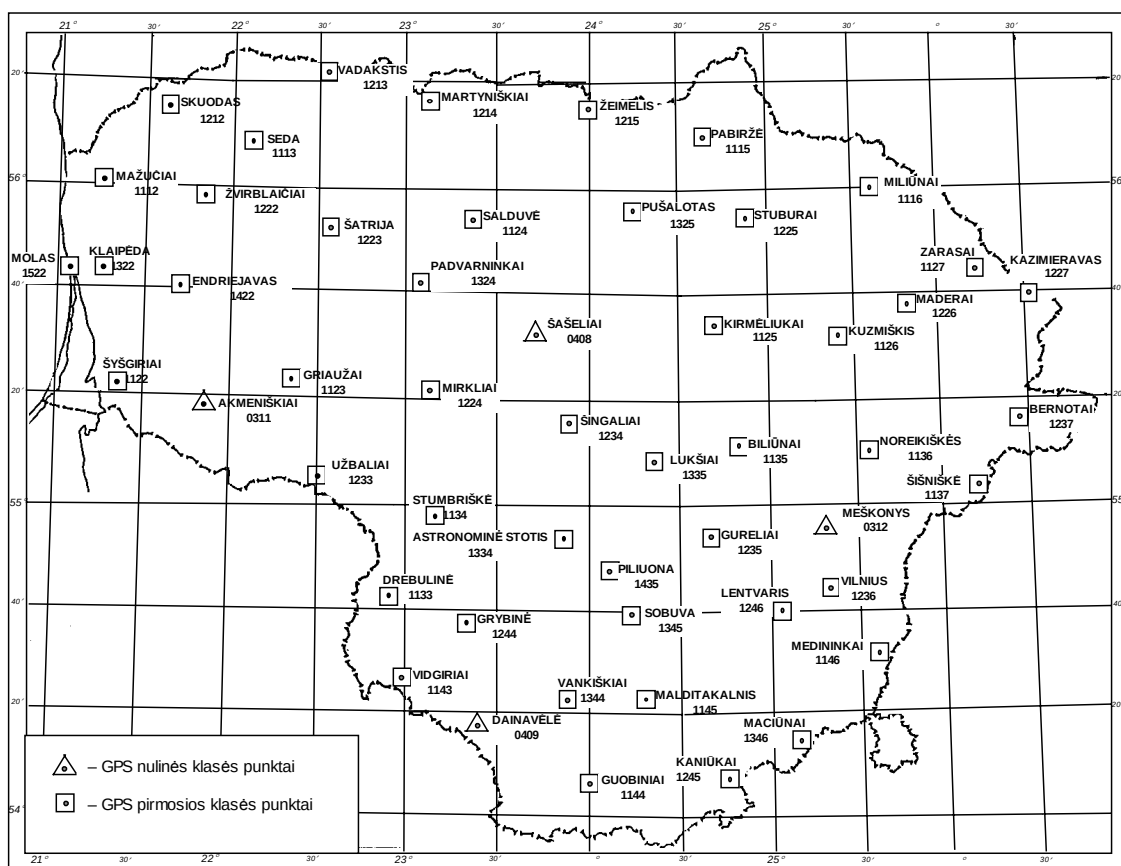
Remiantis istoriniais duomenimis, 250 km spindulio zonoje apie dabartinę atominę elektrinę yra buvę 13 Žemės drebėjimų, kai kurių intensyvumas siekė 7 balus (pagal MSK–64 dvylikos balų skalę) [219]. Arčiausiai (epicentras 35 km nuo elektrinės, buvo 1908 m. Daugpilio 6 balų Žemės drebėjimas ir Gudogų 7 balų (epicentras 125 km nuo elektrinės) bei 1821 m. Koknesės 7 balų (epicentras 135 km atstumu nuo elektrinės) Žemės drebėjimai. Šių Žemės drebėjimų epicentrai susiję su Daugpilio, Vilniaus–Ašmenos ir Gulbės seismogeniniais regioniniais lūžiais [180, 219, 235].

Išsamesnės informacijos apie dabartinį tektoninį Žemės plutos aktyvumą Ignalinos atominės elektrinės rajone galima gauti, be vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų, atliekant ir horizontaliųjų Žemės plutos judesių matavimus.

## 2.2. GEODEZINIŲ TINKLŲ HORIZONTALIESIEMS ŽEMĖS PLUTOS JUDESIAMS TIRTI PANAUDOJIMAS

Horizontaliesiems Žemės plutos judesiams tirti Pasaulinėje praktikoje naudojami trianguliacijos, trilateracijos bei GPS matavimų duomenys [32, 37, 62, 63, 130, 132, 159, 172, 174].

Lietuvoje Žemės plutos judesių tyrimams atlikti galima naudoti iki 1940 m. sudarytą trianguliacijos tinklą ir taikant kosminės geodezijos metodus 1992–1994 metais sudarytą nulinės bei pirmosios klasės geodezinį GPS tinklą (2.4 pav.) [167, 172, 174, 176, 177].



2.4 pav. Lietuvos valstybinis GPS nulinės ir pirmosios klasės tinklas

Tinklo pirmojo matavimo duomenys paimti iš Lietuvos teritorijoje sudaryto pirmosios ir antrosios klasės trianguliacijos tinklo matavimų, atliktų 1926–1940 metais [68, 175]. Bendras pirmosios ir antrosios klasės trianguliacijos tinklo tikslumas Lietuvos teritorijoje apibūdinamas 0,3"–1,2" vidutinėmis kvadratinėmis kampų matavimo paklaidomis ir 1:295000–1:206000 santykinėmis kraštinių paklaidomis [167, 175].

GPS nulinės klasės tinklas sudarytas 1992 m., atlikus matavimus pagal tarptautinę programą EUREF BAL 92. Lietuvos teritorijoje koordinuoti 4 (Akmeniškiai – 0311, Dainavėlė – 0409, Šašeliai – 0406, Meškonys – 0312 (2.4 pav.)) šio tinklo punktai [104, 105, 173, 175, 177], kuriais buvo nustatytas naujai sudaromo šalyje GPS tinklo ryšys su Europos geodeziniu tinklu EUREF 89. GPS nulinės klasės EUREF BAL 92 tinklo matavimų rezultatų matematinis apdorojimas, šio tinklo išlyginimas ir punktų ETRS 89 sistemos koordinačių skaičiavimai atlikti Danijos topografijos ir kadastro departamente [82]. Atraminiais laikyti EUREF 89 tinklo WETTZELL 035, KALSBURG 313, KOBENHAVN 412, KLINTA 015, MARTSBO 013 ir METSÄHOVI 011 punktai. Punktus jungiančių stygų vektorių santykinės paklaidos  $1 \cdot 10^{-7}$ , o elipsoidinių aukščių –  $2 \cdot 10^{-7}$  [108, 144, 175]. Punktų geodezinės platumos ir geodezinės ilgumos paklaidos neviršija 9 mm, elipsoidinio aukščio paklaida – 30 mm [105, 106]. Visi keturi nulinės klasės punktai sutapatinti su trianguliacijos punktais.

Pirmosios klasės tinklo, besiremiančio į nulinės klasės tinklą, projektavimas pradėtas 1992 m. Į projektuojamą GPS tinklą norėta įtraukti kuo daugiau pirmosios klasės, Laplaso, Baltijos grandinės, buvusio Vilniaus krašto trianguliacijos punktų, siekiant gauti patikimesnį ryšį tarp 1942 m. ir naujosios koordinačių sistemų. Parenkant GPS matavimams tinkančias punktų vietas, buvo atsižvelgta ne tik į pagrindinių reperijų bei precizinės niveliacijos linijų išsidėstymą, bet ir į geotektoninius sprūdžius.

GPS nulinės ir pirmosios klasės tinkle yra 52 punktai (2.4 pav.). Su trianguliacijos punktais sutampa 45 GPS punktai (2.1 lentelė). Pirmosios klasės GPS tinklo stygų matavimo didžiausia santykinė paklaida siekia  $1,7 \cdot 10^{-7}$  [128, 175]. Pirmosios klasės GPS tinklo punktų koordinačių paklaidos meridiano ir paralelės kryptimi neviršija 6 mm nulinės klasės punktų atžvilgiu [105, 128, 175].

Nustatyta, kad tinklai yra homogeniški ir GPS nulinės klasės tinklo skirtingi išlyginimo variantai neturi realios įtakos horizontaliųjų deformacijų analizės rezultatams [167].

Lietuvos GPS tinklo ir trianguliacijos tinklo yra kitos koordinačių sistemos. Kad būtų galima koordinates palyginti bei išvengti projekcijos mastelio įtakos tyrimo rezultatams, trianguliacijos tinklo plokštuminės stačiakampės koordinatės perskaičiuotos iš 1942 m. koordinačių sistemos į LKS 94 koordinačių sistemą. Plokštuminės koordinatės perskaičiuotos naudojant [175] darbe nustatytus ryšius tarp koordinačių sistemų ir perskaičiavimo metodus.

Punktų plokštuminės koordinatės nustatytos trianguliacijos  $(x_{TR}, y_{TR})$  bei GPS  $(x_{GPS}, y_{GPS})$  metodais pateikiamos 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Lietuvos geodezinių tinklų punktų koordinatės ir jų pokyčiai

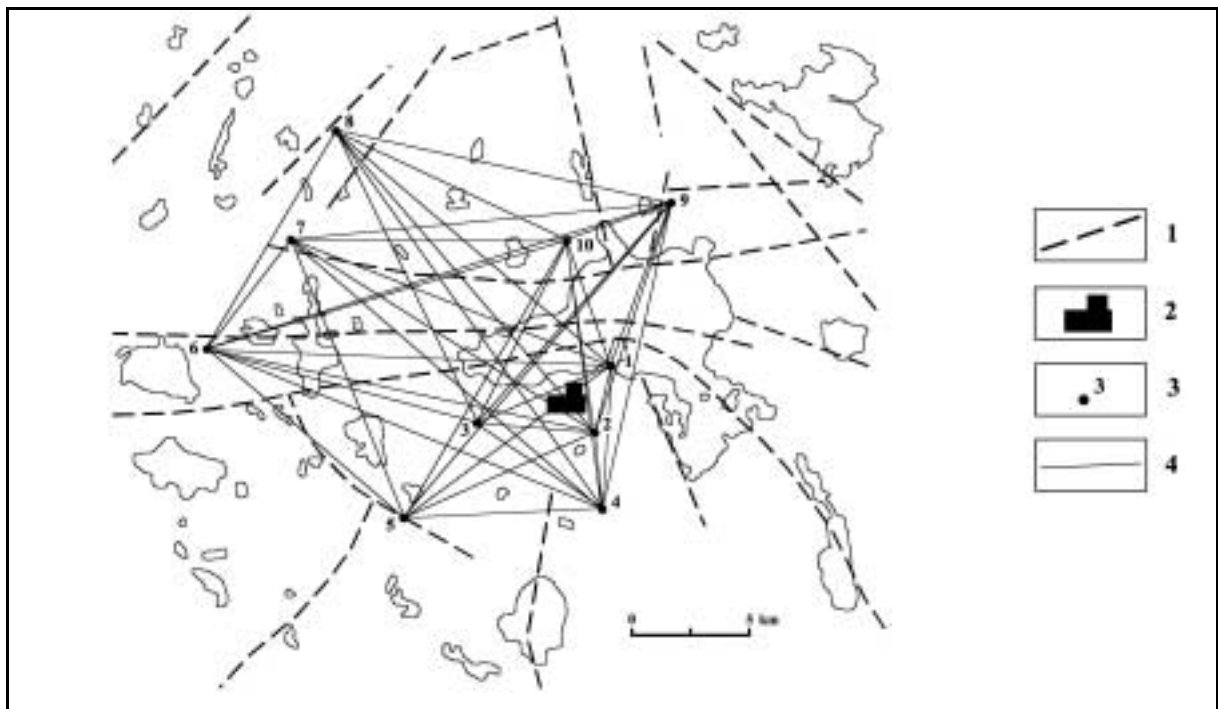
| Nr.  | Punktas                 | $x_{TR}$<br>(m)    | $y_{TR}$<br>(m) | $x_{GPS}$<br>(m)   | $y_{GPS}$<br>(m) | $\Delta x_i$<br>(m) | $\Delta y_i$<br>(m) |
|------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|      |                         | Pirmasis matavimas |                 | Antrasis matavimas |                  |                     |                     |
| 0311 | Akmeniškiai             | 6133606,078        | 362420,476      | 6133606,022        | 362420,375       | -0,056              | -0,101              |
| 0312 | Meškonys                | 6089118,526        | 584389,601      | 6089118,304        | 584389,823       | -0,222              | 0,222               |
| 0408 | Šašeliai                | 6156799,483        | 481318,597      | 6156799,490        | 481318,659       | 0,007               | 0,062               |
| 0409 | Dainavėlė               | 6015165,695        | 460745,155      | 6015165,747        | 460745,250       | 0,052               | 0,095               |
| 1112 | Mažučiai                | 6214000,608        | 326090,445      | 6214000,500        | 326090,851       | -0,108              | 0,406               |
| 1113 | Seda                    | 6228116,084        | 380793,869      | 6228116,045        | 380793,893       | -0,039              | 0,024               |
| 1115 | Pabiržė                 | 6227468,828        | 538861,733      | 6227468,684        | 538861,553       | -0,144              | -0,180              |
| 1116 | Miliūnai                | 6210678,411        | 599862,505      | 6210678,383        | 599862,305       | -0,028              | -0,200              |
| 1122 | Šyšgiriai               | 6140495,520        | 332863,318      | 6140495,596        | 332863,236       | 0,076               | -0,082              |
| 1123 | Griaužai                | 6142021,506        | 394660,995      | 6142021,511        | 394660,963       | 0,005               | -0,032              |
| 1124 | Salduvė                 | 6199665,495        | 459938,657      | 6199665,568        | 459938,630       | 0,073               | -0,027              |
| 1125 | Kirmėliukai             | 6160828,733        | 543881,702      | 6160828,655        | 543881,706       | -0,078              | 0,004               |
| 1126 | Kuzmiškis               | 6156948,257        | 588126,192      | 6156948,208        | 588126,169       | -0,049              | -0,023              |
| 1127 | Zarasai                 | 6181727,621        | 640978,713      | 6181727,806        | 640978,455       | 0,185               | -0,258              |
| 1133 | Drebulinė               | 6062556,523        | 429247,502      | 6062556,468        | 429247,656       | -0,055              | 0,154               |
| 1134 | Stumbriškė              | 6093808,127        | 445833,461      | 6093808,208        | 445833,533       | 0,081               | 0,072               |
| 1135 | Biliūnai                | 6117511,561        | 553024,352      | 6117511,438        | 553024,507       | -0,123              | 0,155               |
| 1136 | Noreikiškės             | 6116899,728        | 600267,975      | 6116899,627        | 600268,004       | -0,101              | 0,029               |
| 1137 | Šišniškė                | 6105281,051        | 641370,128      | 6105280,911        | 641370,112       | -0,140              | -0,016              |
| 1143 | Vidgiriai               | 6032966,377        | 434060,906      | 6032966,407        | 434061,091       | 0,030               | 0,185               |
| 1144 | Guobiniai               | 5994622,085        | 499724,562      | 5994622,209        | 499724,893       | 0,124               | 0,331               |
| 1145 | Maldita-<br>kalnis      | 6024800,274        | 519382,468      | 6024800,316        | 519382,589       | 0,042               | 0,121               |
| 1146 | Medininkai              | 6045039,408        | 605354,232      | 6045039,252        | 605354,508       | -0,156              | 0,276               |
| 1214 | Martyniškiai            | 6241411,979        | 445284,920      | 6241411,619        | 445284,758       | -0,360              | -0,162              |
| 1222 | Žvirblaičiai            | 6206154,246        | 365550,641      | 6206154,173        | 365550,813       | -0,073              | 0,172               |
| 1223 | Šatrija                 | 6194097,964        | 409776,459      | 6194097,980        | 409776,482       | 0,016               | 0,023               |
| 1224 | Mirkliai                | 6137300,171        | 445119,107      | 6137300,287        | 445119,105       | 0,116               | -0,002              |
| 1225 | Stuburai                | 6199261,788        | 554846,589      | 6199261,698        | 554846,393       | -0,090              | -0,196              |
| 1226 | Maderai                 | 6169419,848        | 613325,210      | 6169419,891        | 613325,126       | 0,043               | -0,084              |
| 1233 | Užbaliai                | 6106443,969        | 403847,878      | 6106443,928        | 403847,848       | -0,041              | -0,030              |
| 1234 | Šingaliai               | 6124532,151        | 491860,698      | 6124532,317        | 491861,080       | 0,166               | 0,382               |
| 1235 | Gureliai                | 6085345,427        | 542683,189      | 6085345,313        | 542683,372       | -0,114              | 0,183               |
| 1237 | Bernotai                | 6130361,169        | 655848,737      | 6130361,058        | 655848,700       | -0,111              | -0,037              |
| 1244 | Grybinė                 | 6053283,228        | 456748,337      | 6053283,308        | 456748,442       | 0,080               | 0,105               |
| 1245 | Kaniūkai                | 5996122,558        | 548847,705      | 5996122,577        | 548848,028       | 0,019               | 0,323               |
| 1246 | Lentvaris               | 6058171,604        | 566304,288      | 6058171,405        | 566304,539       | -0,199              | 0,251               |
| 1322 | Klaipėda                | 6183507,281        | 325458,352      | 6183507,375        | 325458,521       | 0,094               | 0,169               |
| 1324 | Padvar-<br>ninkai       | 6176504,206        | 441388,513      | 6176504,279        | 441388,428       | 0,073               | -0,085              |
| 1325 | Pušalotas               | 6200504,376        | 514355,898      | 6200504,388        | 514355,811       | 0,012               | -0,087              |
| 1334 | Astrono-<br>minė stotis | 6084204,619        | 491767,555      | 6084204,642        | 491767,679       | 0,023               | 0,124               |
| 1335 | Lukšiai                 | 6111689,872        | 521939,257      | 6111689,740        | 521939,528       | -0,132              | 0,271               |

## 2.1 lentelės tęsinys

| Nr.  | Punktas     | $x_{TR}$<br>(m)    | $y_{TR}$<br>(m) | $x_{GPS}$<br>(m)   | $y_{GPS}$<br>(m) | $\Delta x_i$<br>(m) | $\Delta y_i$<br>(m) |
|------|-------------|--------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|      |             | Pirmasis matavimas |                 | Antrasis matavimas |                  |                     |                     |
| 1344 | Vankišskiai | 6024461,589        | 491783,854      | 6024461,635        | 491783,921       | 0,046               | 0,067               |
| 1345 | Sobuva      | 6055657,883        | 513896,688      | 6055657,776        | 513896,811       | −0,107              | 0,123               |
| 1346 | Maciūnai    | 6011977,577        | 576123,645      | 6011978,082        | 576122,715       | 0,505               | −0,930              |
| 1422 | Endriejavas | 6175222,430        | 355539,701      | 6175222,370        | 355539,630       | −0,060              | −0,071              |

## 2.3. IGNALINOS ATOMINĖS ELEKTRINĖS GEODINAMINIS POLIGONAS

1998 m. Ignalinos atominės elektrinės rajone įrengtas specialus geodinaminis poligonas dabartiniams horizontaliesiems Žemės plutos judesiams matuoti iš 10–ies 2,5 m įgilintų gruntinių punktų, kuriuose atliekamas ir priverstinis prietaisų centravimas [2, 54, 81, 138, 140, 190, 193, 194, 214]. Punktų išdėstymo bei matuotų stygų schema parodyta 2.5 pav.



**2.5 pav.** Geodinaminio poligono punktų ir GPS matavimų schema: 1 – tektoniniai lūžiai (sudarė P. Suveizdis), 2 – Ignalinos atominė elektrinė, 3 – GPS punktas, 4 – matuota styga

Šiuose punktuose su GPS pagalba stebimi horizontalieji Žemės plutos judesiai. Punktai išdėstyti taip, kad būtų galima kontroliuoti svarbiausių Žemės plutos lūžių ribojamų blokų judesius. Siekiant ištirti Ignalinos atominės elektrinės artimiausios aplinkos dabartinį tektoninį aktyvumą, keturi tinklo punktai įrengti nuo elektrinės iki 10 km atstumu. Kiti (6 punktai) yra

kelių dešimčių kilometrų atstumu nuo elektrinės. Punktai išdėstyti taip, kad būtų galima kontroliuoti platuminės krypties neotektoninę zoną, einančią prie pat elektrinės, Apvardų meridianinių lūžių zoną, meridianinės krypties neotektoninę zoną, kur požeminiame vandenyje nustatyta padidėjusi helio dujų koncentracija, Drūkšių įlinkio santykinus judėjimus vienas kito atžvilgiu.

Ignalinos atominės elektrinės apylinkių tektoninio stabilumo tyrimams ypač svarbus 1, 2 ir 3 punktų trikampis. Tarp 1 punkto ir 2, 3 punktų išskiriama platuminės krypties neotektoninė linijinė zona, kuri praeina prie pat elektrinės. Be to, 1 punktas yra tektoninių lūžių zonoje, išskirtoje seisminiais ir geologiniais duomenimis. Neotektoninė platuminė zona skiria 2, 3 ir 4, 5 punktus. Tarp 4 ir 5 punktų praeina Apvardų meridianinių lūžių zona. Šių penkių punktų stebėjimų duomenys leis apibūdinti pagrindinius tektoninius blokus, išskirtus seisminiais, geologiniais ir neotektoniniais metodais. Labai svarbūs 6 ir 7 punktai. Jie atskirti meridianinės krypties neotektonine zona, kur požeminiame vandenyje nustatyta padidėjusi helio dujų koncentracija, o tai rodo zonos šiuolaikinį aktyvumą. 7 ir 10 punktus skiria ŠV–PR krypties tektoninis lūžis. Abu punktai nuo Pietų Drūkšių pakilumos punktų atskirti platumine Visagino lūžių zona. 8 ir 9 punktai leis nustatyti Šiaurės Zarasų pakopos šiuolaikinį aktyvumą, santykinus judėjimus Drūkšių grabeno atžvilgiu. Be to, 9 punktas yra Skirno meridianinės lūžių zonos rytiniame sparne.

Matavimai geodinaminiam poligone atlikti 1998 ir 1999 m. rugsėjį. Matavimai atlikti aštuoniais GPS imtuvais. Matuota *ASHTECH Z-Surveyor* ir *Z-12 GPS* prietaisais. Matavimus atliko VGTU ir Danijos firmos „Nellemann & Bjørnkjær“ specialistai. Ignalinos atominės elektrinės tinklo matavimai truko keturias paras – matuota nepertraukiamai ištisą parą. Matavimų programą sudarė 4 sesijos. Vienos sesijos trukmė – 24 valandos. Visas 4 sesijas buvo matuojama 1, 2, 4, 6, 9, 10 punktuose, o 2 sesijas – 3, 5, 7 ir 8 punktuose. Matavimų programa parodyta 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Matavimų programa

| Sesija | Punkto numeris |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|        | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| A      | x              | x |   | x | x | x | x |   | x | x  |
| B      | x              | x |   | x | x | x | x |   | x | x  |
| C      | x              | x | x | x |   | x |   | x | x | x  |
| D      | x              | x | x | x |   | x |   | x | x | x  |

Baigus Ignalinos atominės elektrinės poligono tinklo GPS matavimus, šis tinklas buvo susietas su valstybiniu GPS pirmosios ir antrosios klasės tinklu. Tai atlikta A ir B matavimų sesijų metu. A sesija truko 9 val., B sesija – 3 val.

Matavimų duomenys apdoroti VGTU Geodezijos institute ir Danijos firmoje „Nellemann & Bjørnkjær“ naudojant programinius paketus GPPS ir FILLNET.

Apdorojus matavimų duomenis nustatyta, kad vidutinės kvadratinės poligono stygų matavimo paklaidos yra 0,3–2,4 mm (stygų ilgiai pateikti 2.3 lentelėje). Punktų koordinačių vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai – ne didesni kaip 0,8 mm [54]. Plokštuminės punktų koordinatės ir jų pokyčiai per laikotarpį nuo 1998 m. rugsėjo iki 1999 m. rugsėjo parodyti 2.4 lentelėje.

**2.3 lentelė.** 1998 m. ir 1999 m. matavimų stygų ilgiai ir jų pokyčiai

| Styga   | Stygų ilgiai (m) |                | Stygų ilgių skirtumas (m)<br>(2) – (1) | Santykinis pailgėjimas |
|---------|------------------|----------------|----------------------------------------|------------------------|
|         | 1998 m.<br>(1)   | 1999 m.<br>(2) |                                        |                        |
| 001–004 | 5308,835         | 5308,839       | 0,004                                  | 1/1327000              |
| 002–004 | 2853,506         | 2853,499       | –0,007                                 | 1/408000               |
| 009–010 | 4177,864         | 4177,859       | –0,005                                 | 1/836000               |
| 003–002 | 4420,613         | 4420,608       | –0,005                                 | 1/884000               |
| 006–007 | 5156,321         | 5156,310       | –0,011                                 | 1/469000               |
| 003–004 | 5690,772         | 5690,767       | –0,005                                 | 1/1138000              |
| 001–009 | 6511,496         | 6511,483       | –0,013                                 | 1/501000               |
| 002–010 | 7204,237         | 7204,234       | –0,003                                 | 1/2401000              |
| 005–004 | 7454,914         | 7454,906       | –0,008                                 | 1/932000               |
| 003–010 | 7553,883         | 7553,881       | –0,002                                 | 1/3777000              |
| 002–009 | 9035,149         | 9035,145       | –0,004                                 | 1/2259000              |
| 006–008 | 9401,717         | 9401,710       | –0,007                                 | 1/1343000              |
| 008–010 | 9508,956         | 9508,947       | –0,009                                 | 1/1057000              |
| 005–006 | 9582,151         | 9582,146       | –0,005                                 | 1/1916000              |
| 001–005 | 9582,554         | 9582,553       | –0,001                                 | 1/9583000              |
| 004–010 | 10056,077        | 10056,067      | –0,010                                 | 1/1006000              |
| 007–010 | 10244,782        | 10244,770      | –0,012                                 | 1/854000               |
| 003–006 | 10377,231        | 10377,222      | –0,009                                 | 1/1153000              |
| 003–009 | 10969,042        | 10969,036      | –0,006                                 | 1/16828000             |
| 004–009 | 11690,095        | 11690,083      | –0,012                                 | 1/974000               |
| 003–008 | 12011,264        | 12011,261      | –0,003                                 | 1/4004000              |
| 008–009 | 12799,068        | 12799,053      | –0,015                                 | 1/853000               |
| 002–007 | 13368,698        | 13368,687      | –0,011                                 | 1/1215000              |
| 001–008 | 13454,805        | 13454,793      | –0,012                                 | 1/1121000              |
| 006–010 | 13982,682        | 13982,664      | –0,018                                 | 1/777000               |
| 007–009 | 14237,352        | 14237,335      | –0,017                                 | 1/837000               |
| 002–006 | 14746,913        | 14746,897      | –0,016                                 | 1/922000               |
| 002–008 | 14761,254        | 14761,245      | –0,009                                 | 1/1640000              |
| 001–006 | 15042,782        | 15042,769      | –0,013                                 | 1/1157000              |
| 004–007 | 15305,792        | 15305,781      | –0,011                                 | 1/1391000              |
| 005–009 | 15433,019        | 15433,009      | –0,010                                 | 1/1543000              |
| 004–006 | 15863,829        | 15863,819      | –0,010                                 | 1/1586000              |
| 004–008 | 17181,439        | 17181,431      | –0,008                                 | 1/2148000              |
| 006–009 | 18155,461        | 18155,439      | –0,022                                 | 1/825000               |

**2.4 lentelė.** Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono punktų koordinatės ir jų pokyčiai

| Punkto<br>numeris | $x_{98}$ (m)       | $y_{98}$ (m) | $x_{99}$ (m)       | $y_{99}$ (m) | $\Delta x$ (m) | $\Delta y$ (m) |
|-------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|
|                   | Pirmasis matavimas |              | Antrasis matavimas |              |                |                |
| 1                 | 6166373,772        | 662793,511   | 6166373,772        | 662793,511   | 0,000          | 0,000          |
| 2                 | 6163911,515        | 662186,465   | 6163911,528        | 662186,469   | 0,013          | 0,004          |
| 3                 | 6164276,247        | 657780,546   | 6164276,255        | 657780,555   | 0,008          | 0,009          |
| 4                 | 6161073,407        | 662485,044   | 6161073,417        | 662485,044   | 0,010          | 0,000          |
| 5                 | 6160745,917        | 655036,724   | 6160745,930        | 655036,728   | 0,013          | 0,004          |
| 6                 | 6166983,435        | 647762,041   | 6166983,429        | 647762,049   | −0,006         | 0,008          |
| 7                 | 6171076,298        | 650898,683   | 6171076,301        | 650898,685   | 0,003          | 0,002          |
| 8                 | 6175083,175        | 652536,489   | 6175083,165        | 652536,487   | −0,010         | −0,002         |
| 9                 | 6172475,732        | 665068,225   | 6172475,736        | 665068,226   | 0,004          | 0,001          |
| 10                | 6171040,621        | 661144,137   | 6171040,626        | 661144,137   | 0,005          | 0,000          |

## 2.4. IŠVADOS

1. Visai Lietuvos teritorijai naudojant trianguliacijos bei kosminės geodezijos metodais sudarytų geodezinių tinklų matavimų duomenis, dėl riboto trianguliacijos tinklo tikslumo, šiuo metu galima nustatyti tik bendras dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos judesių tendencijas.

2. Ignalinos geodinaminio poligono GPS matavimų tikslumas yra pakankamas, kad būtų galima nustatyti bei įvertinti dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos judesių skaitmeninius rodiklius. Stygų ilgių pokyčių kitimo amplitudės reikšmė yra 26 mm, o maksimali vidutinė kvadratinė geodezinio tinklo stygų matavimo paklaida yra 2,4 mm, t. y. stygų ilgių pokyčių amplitudė yra apie 11 kartų didesnė už jų nustatymo maksimalią vidutinę kvadratinę paklaidą. Punktų koordinatų nustatymo maksimalus vidutinis kvadratinis nuokrypis – 0,8 mm. Koordinatų pokyčiai pagal abscisų ašį kinta nuo -10 mm iki 13 mm, o pagal ordinačių ašį kinta nuo -2 mm iki 9 mm. Matyti, kad abscisų pokyčių amplitudė yra apie 29 kartus didesnė, o ordinačių pokyčių amplitudė apie 14 kartų didesnė už koordinatų nustatymo maksimalų vidutinį kvadratinį nuokrypį.

### **3. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMO METODIKA**

#### **3.1. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TENZORIAUS KOMPONENČIŲ ĮVERTINIMAS IR DEFORMACIJŲ SKAIČIAVIMAS**

Patogiausias metodas tiriant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas yra palyginti skirtingu laiku sudarytų geodezinių tinklų punktų koordinatas, nes geodezinių tinklų elementų pokyčiai susiję su tinklo punktų tarpusavio padėties pasikeitimais. Šiuo metu tyrimams atlikti plačiai taikomi GPS matavimai [10, 25, 36, 38, 39, 42, 45, 46, 52, 58, 63, 65, 73, 78, 88, 89, 90, 94, 97, 99, 100, 103, 112, 117, 119, 129, 150, 157, 168, 192, 199, 201, 205, 225]. Pagal punktų koordinačių skirtumus nustatomos Žemės plutos judesių charakteristikos.

Tiriant Žemės plutos horizontaliąsias deformacijas bei tektoninius įtempius taikoma invariantiška koordinačių sistemos pradžia bei orientavimui tenzorinės analizės metodika, nepriklausanti nuo tvirtų punktų parinkimo. Žemės plutos deformacijoms ir įtempiams apibūdinti užtenka antrojo rango tenzorių [167, 175].

Deformacijų bei įtempių rodikliai įvertinti baigtinių elementų metodu, darant prielaidą, kad pasirinktų riboto dydžio geometrinių elementų deformacijos yra izotropinio pobūdžio.

Nustatant diferencialinį ryšį tarp poslinkių ir horizontaliųjų deformacijų, daroma prielaida, kad poslinkiai, palyginti su kūno matmenimis, yra maži.

##### **3.1.1. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir poslinkių sąsajos**

Horizontaliosioms Žemės plutos deformacijoms apibūdinti invariantiškai koordinačių sistemų atžvilgiu taikoma tenzorinės analizės metodika [8, 15, 20, 22, 24, 43, 64, 66, 71, 72, 87, 111, 116, 122, 143, 151, 152, 161, 167, 170, 172, 174, 175, 177, 182, 187, 195, 207, 213]. Deformacijų tenzorius komponentėms įvertinti taikytas baigtinių elementų metodas. Daroma prielaida, kad baigtinio elemento (trikampio) ribose deformacijos yra vienalytės.

Turint geodezinio tinklo punktų plokščiąsias koordinatas  $(x, y)$  ir pagal kartotinių matavimų duomenis apskaičiuotus geodezinio tinklo koordinačių poslinkius  $\Delta x, \Delta y$ , Žemės plutos horizontaliąsias deformacijas galima aprašyti antrojo rango tenzoriumi [143, 152, 167, 213]:

$$\|T\| = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{array} \right\|, \quad (3.1)$$

čia

$$u = \Delta x = u(x, y), \quad (3.2)$$

$$v = \Delta y = v(x, y), \quad (3.3)$$

$u$ ,  $v$  – koordinačių pokyčiai, išreikšti tiesinėmis koordinačių funkcijomis Dekarto koordinačių sistemoje,  $e_{11} = e_{xx}$ ,  $e_{22} = e_{yy}$ ,  $e_{12} = e_{xy}$ ,  $e_{21} = e_{yx}$  – antrojo rango deformacijų tenzoriaus elementai.

Tenzoriaus (3.1) elementai apskaičiuojami iš formulės [175, 192]:

$$e_{ij} = \frac{D_{ij}}{D}, \quad (3.4)$$

čia  $i$  ir  $j$  – tenzoriaus elementų ir determinantų indeksai, kurių reikšmės kinta nuo 1 iki 2.

I (3.4) įeinantys determinantai [167, 175]:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (3.5)$$

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (3.6)$$

$$D_{12} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta x_1 \\ 1 & x_2 & \Delta x_2 \\ 1 & x_3 & \Delta x_3 \end{vmatrix}, \quad (3.7)$$

$$D_{21} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta y_1 & y_1 \\ 1 & \Delta y_2 & y_2 \\ 1 & \Delta y_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (3.8)$$

$$D_{22} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta y_1 \\ 1 & x_2 & \Delta y_2 \\ 1 & x_3 & \Delta y_3 \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

čia  $\Delta x_i = x'_i - x_i$ ,  $\Delta y_i = y'_i - y_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  – trikampio viršūnės,  $x'_i$ ,  $y'_i$  – pagal antrojo tinklo matavimo rezultatus nustatytos koordinatės,  $x_i$ ,  $y_i$  – pagal pirmojo tinklo matavimo rezultatus nustatytos koordinatės.

Tenzorių (3.1) galima išskaidyti į dvi dalis [143, 151, 172, 213]:

$$\|T\| = \|A\| + \|W\|, \quad (3.10)$$

$$\|A\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix} = \quad (3.11)$$

$$= \begin{vmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{yy} \end{vmatrix},$$

$$\|W\| = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\omega_{xy} \\ \frac{1}{2}\omega_{yx} & 0 \end{vmatrix} = \quad (3.12)$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}(e_{xy} - e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} - e_{xy}) & 0 \end{vmatrix},$$

čia  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  – santykinės linijinės deformacijos,  $\varepsilon_{xy}$  – santykinės šlyties deformacijos,  $\omega_{xy}$ ,  $\omega_{yx}$  – baigtinio elemento posūkiai.

Koeficientai  $\frac{1}{2}$  prie šlyties deformacijų formaliai reikalingi tam, kad pereinant nuo vienos koordinačių sistemos prie kitos koordinačių sistemos deformacijų tenzoriaus  $\|A\|$  elementai būtų perskaičiuojami pagal tas pačias, kaip ir įtempių tenzoriaus komponentai, formules [9].

Simetrinio tenzoriaus (3.11) tikrinės reikšmės apibūdina tarpusavyje statmenas svarbiausias tikrąsias santykinės deformacijas [167, 213]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left( (e_{xx} + e_{yy}) \pm \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{xy} + e_{yx})^2} \right), \quad (3.13)$$

čia  $\varepsilon_1$  – didžiausiasis santykinis pailgėjimas,  $\varepsilon_2$  – mažiausiasis santykinis pailgėjimas.

Didžiausiojo pailgėjimo kryptis absčių ašies atžvilgiu [172, 175]:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left( -\frac{e_{xy} + e_{yx}}{e_{xx} - e_{yy}} \right) + \begin{bmatrix} 90^\circ, \text{ kai } (e_{xx} - e_{yy}) > 0 \\ 0^\circ, \text{ kai } (e_{xx} - e_{yy}) < 0 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Baigtinio elemento dilatacija [143, 167]:

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy}, \quad (3.15)$$

deformacijos pagal koordinačių ašis [172, 175]:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_x \\ \Gamma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{xx} - e_{yy} \\ e_{xy} + e_{yx} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

viso poslinkio modulis [172, 177]:

$$\Gamma = \sqrt{\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2}. \quad (3.17)$$

Tenzorius (3.12) apibūdina baigtinio elemento kaip absoliučiai tvirto kūno postūmį ir posūkį [167, 175, 177]:

$$\omega'' = \frac{\rho''}{2}(e_{xy} - e_{yx}), \quad (3.18)$$

čia  $\rho'' = 206264,81'' \approx 206265''$ .

Pagal (3.18) formulę apskaičiuotas kampas apibūdina bendrą trikampio posūkį. Tačiau krypties pokyčiai trikampių viduje ne visi vienodi. Jie priklauso nuo krypties direkcinio kampo (azimuto). Bet kurių krypties pokyčius galima išreikšti formule [167, 175, 177]:

$$dA = \frac{1}{2}(e_{xx} - e_{yy})\sin 2A + \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx})\cos 2A + \omega, \quad (3.19)$$

čia  $A$  – linijos direkcinis kampas (azimutas). Šios formulės pirmieji du elementai susiję su tikrosiomis trikampių deformacijomis ir yra invariantiški koordinatinių sistemų pradžios taško ir koordinatinių sistemų orientavimo atžvilgiu. Trečiasis narys, kaip minėta anksčiau, apibūdina viso trikampio posūkį (jei neatsižvelgsime į jo formos deformacijas). Šis narys nėra invariantiškas koordinatinių sistemų orientavimo krypties atžvilgiu. Todėl, atliekant tyrimus ir nustatant suminį trikampio posūkį, reikia į tai atsižvelgti.

Trikampiui priklausančios atkarpos, kurios direkcinis kampas  $A$ , santykinis pailgėjimas [17, 59]:

$$(\varepsilon_{ij})_A = \left(\frac{1}{N}\right)_A = e_{xx} \cos^2 A + e_{yy} \sin^2 A + \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx})\sin 2A, \quad (3.20)$$

čia  $i, j$  – trikampio kraštinės pradinio ir galinio taškų numeriai.

Remiantis (3.19) formule galima apskaičiuoti trikampio bet kurio plokščiojo kampo pokytį [167, 175, 177]:

$$d\beta = \frac{1}{2}(e_{xx} - e_{yy})(\sin 2A_d - \sin 2A_k) + \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx})(\cos 2A_d - \cos 2A_k), \quad (3.21)$$

čia  $A_d, A_k$  – dešinėsios ir kairėsios linijos direkciniai kampai.

Kaip matyti (3.11) formulėje, tarp Žemės plutos deformacijų

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}^T \quad (3.22)$$

ir poslinkių

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}^T \quad (3.23)$$

vektorių komponentų egzistuoja ryšys [184].

Bendruoju atveju horizontalioje plokštumoje ties deformuojamo kūno tašku deformacijas  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  su poslinkiais  $u$ ,  $v$  sieja trys geometrinės (Koši) lygtys [9, 194, 202]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Operatorine-matricine forma Koši geometrinės lygtys užrašomos [9, 28, 193]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla^T \cdot \mathbf{u}, \quad (3.25)$$

čia  $\nabla$  – Hamiltono operatorius.

Transponuotas Hamiltono operatorius [28, 29, 202]:

$$\nabla^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Plokščiojo įtempių būvio deformacijos  $\varepsilon_{xz} = 0$ ,  $\varepsilon_{yz} = 0$ ,  $\varepsilon_{zz} \neq 0$  [153, 184, 193, 194]:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}), \quad (3.27)$$

čia  $\nu$  – Puasono koeficientas (0,25) [6, 41, 49, 83, 93, 102, 198, 200],  $\varepsilon_{xz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$  – santykinės šlyties deformacijos,  $\varepsilon_{zz}$  – santykinė linijinė deformacija.

Svarbiausiosios horizontaliosios deformacijos apskaičiuojamos iš kvadratinės lygties [9, 191, 213]:

$$\varepsilon^2 - I_1 \cdot \varepsilon + I_2 = 0, \quad (3.28)$$

kuri gaunama išskleidus determinantą [7, 9, 191]:

$$\det \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - \varepsilon & \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} - \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} - \varepsilon & \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} - \varepsilon \end{vmatrix} = 0, \quad (3.29)$$

$$I_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}, \quad (3.30)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2} \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix}, \quad (3.31)$$

čia  $\varepsilon$  – svarbiausiosios deformacijos,  $I_1$ ,  $I_2$  – deformacijų tenzorius invariantai.

Išsprendus kvadratinę lygtį (3.28) gaunamos dvi tikrosios šaknys –  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$ ), t. y.  $\varepsilon_1$  – didžiausias santykinis pailgėjimas,  $\varepsilon_2$  – mažiausias santykinis pailgėjimas.

Poslinkiai baigtiniame elemente (trikampyje) aprašomi formulėmis (naudojant tris mazginius taškus: I, J, K) [7, 202]:

$$u_i = u_I L_1 + u_J L_2 + u_K L_3, \quad (3.32)$$

$$v_i = v_I L_1 + v_J L_2 + v_K L_3, \quad (3.33)$$

čia  $u_I$ ,  $u_J$ ,  $u_K$ ,  $v_I$ ,  $v_J$ ,  $v_K$  – mazginių taškų poslinkiai,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  – normalizuotos koordinatės ( $L$ –koordinatės [14]), kurių reikšmės baigtiniame elemente kinta nuo 0 iki 1.

Baigtinio elemento (trikampio) geometrija, mazginių taškų pasiskirstymas bei koordinatės sistema pateikiama 3.1 paveiksle.

Poslinkių išraiškos mazgų reikšmėmis, kai naudojami šeši mazginiai taškai (I, J, K, L, M, N (3.2 pav.)) [7, 194, 202]:

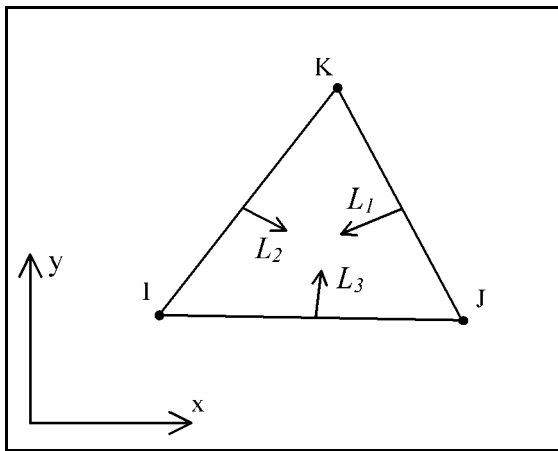
$$u_i = u_I(2L_1 - 1)L_1 + u_J(2L_2 - 1)L_2 + u_K(2L_3 - 1)L_3 +$$

$$+ u_L(4L_1L_2) + u_M(4L_2L_3) + u_N(4L_3L_1),$$
(3.34)

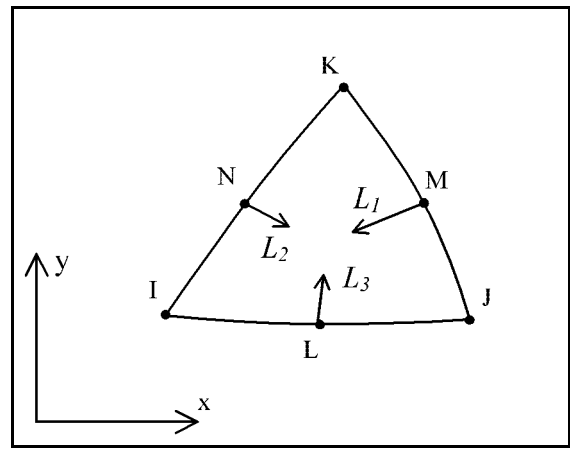
$$v_i = v_I(2L_1 - 1)L_1 + v_J(2L_2 - 1)L_2 + v_K(2L_3 - 1)L_3 +$$

$$+ v_L(4L_1L_2) + v_M(4L_2L_3) + v_N(4L_3L_1),$$
(3.35)

čia  $u_I, u_J, u_K, u_L, u_M, u_N, v_I, v_J, v_K, v_L, v_M, v_N$  – mazginių taškų poslinkiai.



**3.1 pav.** Trikampio geometrinė schema (trys mazginiai taškai)



**3.2 pav.** Trikampio geometrinė schema (šeši mazginiai taškai)

Išvertinant Žemės plutos santykinės deformacijas, kai baigtiniu elementu priimamas keturkampis, kuris aprašytas keturiais mazginiais taškais (I, J, K, L (3.3 pav.)), poslinkių išraiškos užrašomos [7, 142, 163, 202, 215]:

$$u_i = \frac{1}{4}(u_I(1-s_i)(1-t_i) + u_J(1+s_i)(1-t_i) + u_K(1+s_i)(1+t_i) + u_L(1-s_i)(1+t_i)),$$
(3.36)

$$v_i = \frac{1}{4}v_I((1-s_i)(1-t_i) + v_J(1+s_i)(1-t_i) + v_K(1+s_i)(1+t_i) + v_L(1-s_i)(1+t_i)),$$
(3.37)

čia  $u_I, u_J, u_K, u_L, v_I, v_J, v_K, v_L$  – mazginių taškų poslinkiai,  $s_i, t_i$  – skaičiuojamųjų taškų sąlyginių koordinačių reikšmės.

Poslinkiai geometriniam elemente (keturkampyje (3.4 pav.)), kai naudojami aštuoni mazginiai taškai (I, J, K, L, M, N, O, P), aprašomi formulėmis [7, 184, 191, 193, 202]:

$$u_i = \frac{1}{4}(u_I(1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1)+u_J(1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1)+$$

$$+u_K(1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1)+u_L(1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1))+$$

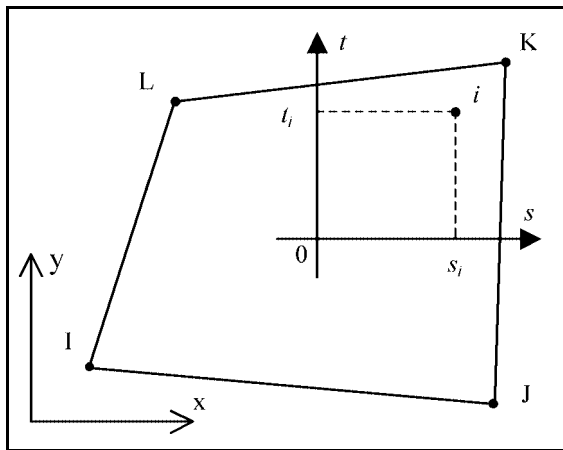
$$+\frac{1}{2}(u_M(1-s_i^2)(1-t_i)+u_N(1+s_i)(1-t_i^2)+u_O(1-s_i^2)(1+t_i)+u_P(1-s_i)(1-t_i^2)),$$

$$v_i = \frac{1}{4}(v_I(1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1)+v_J(1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1)+$$

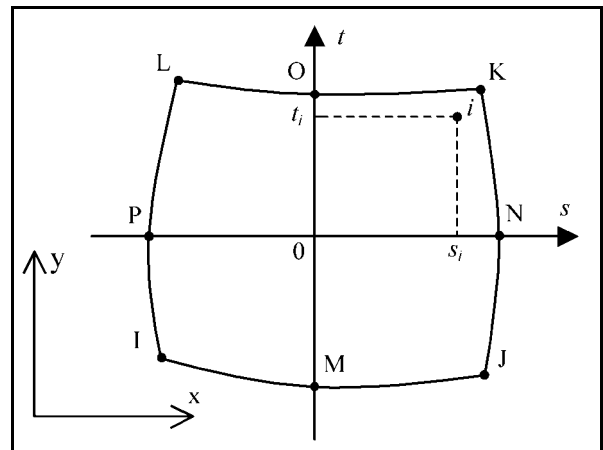
$$+v_K(1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1)+v_L(1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1))+$$

$$+\frac{1}{2}(v_M(1-s_i^2)(1-t_i)+v_N(1+s_i)(1-t_i^2)+v_O(1-s_i^2)(1+t_i)+v_P(1-s_i)(1-t_i^2)),$$

čia  $u_I, u_J, u_K, u_L, u_M, u_N, u_O, u_P, v_I, v_J, v_K, v_L, v_M, v_N, v_O, v_P$  – mazginių taškų poslinkiai.



**3.3 pav.** Keturkampio geometrinė schema  
(keturi mazginiai taškai)



**3.4 pav.** Keturkampio geometrinė schema  
(aštuoni mazginiai taškai)

Sąlyginės kiekvieno baigtinio elemento (keturkampio (3.3 ir 3.4 pav.)) koordinačių sistemos pradžia sutampa su baigtinio elemento svorio centru, ašių kryptys – su pasirinktos

bendrosios koordinatinių sistemos ašių kryptimis, o reikšmės baigtiniame elemente kinta nuo  $-1$  iki  $+1$ .

Kiekvienas baigtinio elemento (trikampio ar keturkampio) mazginis taškas turi du laisvės laipsnius – poslinkius šiaurės ir rytų kryptimis.

### 3.1.2. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afiniojo koordinatinių perskaičiavimo būdu

Teorinis pagrindas deformacijų tenzoriaus komponentėms nustatyti [21, 35, 167] yra prielaida apie baigtinio elemento deformacijų homogeniškumą. Tuomet geodezinio tinklo taškų koordinatinių pokyčiai išreiškiami simpleksinio modelio lygtimis [21, 148, 189]:

$$\Delta x_i = x'_i - x_i = \alpha + e_{11}x_i + e_{12}y_i, \quad (3.40)$$

$$\Delta y_i = y'_i - y_i = \beta + e_{21}x_i + e_{22}y_i, \quad (3.41)$$

čia  $x'_i$ ,  $y'_i$ ,  $x_i$ ,  $y_i$  – antrojo ir pirmojo matavimų ciklo koordinatės,  $e_{11}$ ,  $e_{12}$ ,  $e_{21}$ ,  $e_{22}$  – antrojo rango deformacijų tenzoriaus (3.1) komponentės,  $\alpha$ ,  $\beta$  – laisvieji nariai.

Taikant afinųjį koordinatinių perskaičiavimą, sąsajas tarp antrojo matavimo ir pirmojo matavimo koordinatinių galima išreikšti lygtimis [148, 189, 190, 214]:

$$x'_i = a_o + a_x x_i + a_y y_i, \quad (3.42)$$

$$y'_i = b_o + b_x x_i + b_y y_i. \quad (3.43)$$

Ryšio lygčių (3.42, 3.43) koeficientai įvertinami sprendžiant lygčių sistemą [189]:

$$\begin{bmatrix} \sum x^2 & \sum xy & 0 \\ & \sum y^2 & 0 \\ & & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum xx' & \sum xy' \\ \sum yx' & \sum yy' \\ \sum x' & \sum y' \end{bmatrix}, \quad (3.44)$$

$n$  – taškų skaičius (kai baigtinis elementas trikampis,  $n = 3$ ).

Iš (3.40) ir (3.41) lygčių galima parašyti [148, 189, 190, 214]:

$$x'_i = \alpha + (e_{11} + 1)x_i + e_{12}y_i, \quad (3.45)$$

$$y'_i = \beta + e_{21}x_i + (e_{22} + 1)y_i. \quad (3.46)$$

Palyginę (3.42, 3.43, 3.45 ir 3.46) lygtis rašome [189, 190, 214]:

$$\begin{cases} \alpha = a_o, \\ \beta = b_o, \\ e_{11} = a_x - 1, \\ e_{12} = a_y, \\ e_{21} = b_x, \\ e_{22} = b_y - 1. \end{cases} \quad (3.47)$$

Iš (3.47) lygčių matyti, kad deformacijų tenzoriaus (3.1) komponentes galima įvertinti turint apskaičiuotus (3.44) lygčių sistemos sprendinio afiniosios koordinačių transformacijos (3.42, 3.43) lygčių koeficientus.

Atsižvelgus į deformacijų tenzoriaus elementų ir afiniojo koordinačių transformavimo koeficientų (3.47) sąsają, taikant afiniojo transformavimo koeficientus, apskaičiuojami pagrindiniai deformacijų rodikliai.

Iš (3.13) ir (3.47) galima parašyti, kad svarbiausių deformacijų reikšmės [189, 190, 214]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (a_x + b_y - 2) \pm \sqrt{(a_x - b_y)^2 + (a_y + b_x)^2} \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Didžiausiojo pailgėjimo kryptis (3.14) [189, 190, 214]:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{a_y + b_x}{b_y - a_x} + \begin{bmatrix} 90^\circ, \text{ kai } (a_x - b_y) > 0 \\ 0^\circ, \text{ kai } (a_x - b_y) < 0 \end{bmatrix}, \quad (3.49)$$

dilatacija (3.15):

$$\Delta = a_x + b_y - 2, \quad (3.50)$$

baigtinio elemento posūkis (3.18):

$$\omega'' = \frac{\rho''}{2}(a_y - b_x), \quad (3.51)$$

krypties pokytis (3.19):

$$dA = \frac{1}{2}(a_x - b_y)\sin 2A + \frac{1}{2}(a_y + b_x)\cos 2A + \omega, \quad (3.52)$$

santykinis pailgėjimas azimuto  $A$  kryptimi (3.20):

$$(\varepsilon_{ij})_A = (a_x - 1)\cos^2 A + (b_y - 1)\sin^2 A + \frac{1}{2}(a_y + b_x)\sin 2A, \quad (3.53)$$

kampo pokytis (3.21):

$$d\beta = \frac{1}{2}(a_x - b_y)(\sin 2A_d - \sin 2A_k) + \frac{1}{2}(a_y + b_x)(\cos 2A_d - \cos 2A_k). \quad (3.54)$$

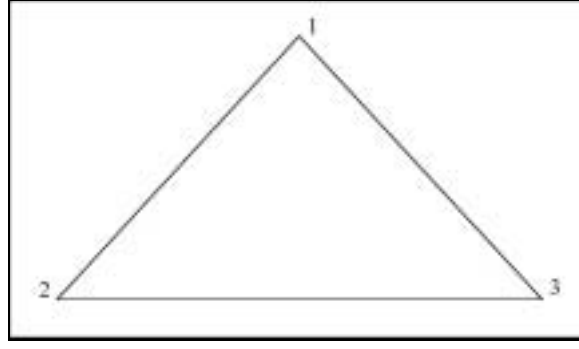
Taip nustatyti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tenzorius komponentų ir deformacijų parametrai patogūs naudoti praktiškai, nes daugelyje specializuotų geodezinių matavimų duomenų apdorojimo programinių paketų yra standartiniai paprogramiai afiniojo koordinatų perskaičiavimo ryšio lygčių koeficientams apskaičiuoti, t. y. esant tai pačiai programai galima spręsti ir įprastinius geodezijos bei kartografijos uždavinius, ir pagal kartotinių matavimų rezultatus nustatyti horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas.

### 3.1.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tenzorius komponentų skaičiavimas naudojant trikampio kraštinių ilgius ir direkcinis kampas

Įvertinant deformacijų tenzorius komponentes baigtinių elementų metodu, kaip tokį elementą patogų nagrinėti trikampį (3.5 pav.).

Pagal trikampio viršūnių plokštumines stačiakampes koordinatas apskaičiuojami kraštinių ilgiai bei direkciniai kampai.

Kai žinoma linijos kryptis, santykinę linijos deformaciją baigtinio elemento ribose, galima apskaičiuoti pagal (3.20) formulę.



**3.5 pav.** Baigtinis elementas – trikampis

Santykiniai linijų pailgėjimai visoms trimis trikampio kraštinėms apskaičiuojami pagal formulę [33, 131, 167]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{l''_{ij} - l'_{ij}}{l'_{ij}}, \quad (3.55)$$

čia  $l'_{ij}$  – pagal pirmojo tinklo matavimo rezultatus nustatytas trikampio kraštinės ilgis (pirmoji padėtis),  $l''_{ij}$  – pagal antrojo tinklo matavimo rezultatus nustatytas trikampio kraštinės ilgis (antroji padėtis),  $i, j$  – trikampio kraštinės pradinio ir galinio taškų numeriai.

Pagal (3.55) formulę apskaičiavus trikampio kraštinių santykinius linijų pailgėjimus ( $\varepsilon_{21}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}$  (3.5 pav.)) ir žinant jų direkcinis kampus, taikant (3.20) lygybę galima sudaryti trijų lygčių sistemą, kuriose nežinomieji būtų deformacijų tenzoriaus komponentės:

$$\begin{cases} \varepsilon_{21} = e_{11} \cos^2 A_{21} + e_{22} \sin^2 A_{21} + \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \sin 2A_{21} , \\ \varepsilon_{23} = e_{11} \cos^2 A_{23} + e_{22} \sin^2 A_{23} + \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \sin 2A_{23} , \\ \varepsilon_{13} = e_{11} \cos^2 A_{13} + e_{22} \sin^2 A_{13} + \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \sin 2A_{13} . \end{cases} \quad (3.56)$$

Taikant (3.56) lygčių sistemą, gaunamos deformacijų tenzoriaus komponentių  $e_{11}$ ,  $e_{22}$  reikšmės ir  $(e_{12} + e_{21})$  suma. Pagal gautąsias reikšmes galima apskaičiuoti pagrindinius horizontaliųjų deformacijų rodiklius (3.13)–(3.17), nors ir nežinomos  $e_{12}$  bei  $e_{21}$  reikšmės, kadangi skaičiuojant minėtus horizontaliųjų deformacijų rodiklius formulėse yra tik komponentių suma  $(e_{12} + e_{21})$ .

### 3.1.4. Apibendrintosios horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų charakteristikos

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų daugiakampių geometrinių figūrų arba blokinių struktūrų apibendrintąsias charakteristikas galima įvertinti mažiausiųjų kvadratų metodu [126, 127, 224], taikant laisvojo taškų poslinkio tolygiai besideformuojančioje dvimatėje erdvėje modelį [96, 167, 192].

Toks taškų poslinkių modelis [167, 192]:

$$\Delta X = H \cdot T, \quad (3.57)$$

čia

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}, \quad (3.58)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{s_1} & x_{s_1} & 0 & y_{s_1} \\ 0 & 1 & x_{s_1} & 0 & y_{s_1} & x_{s_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_{s_i} & x_{s_i} & 0 & y_{s_i} \\ 0 & 1 & x_{s_i} & 0 & y_{s_i} & x_{s_i} \end{bmatrix}, \quad (3.59)$$

$$T = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ \omega \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}. \quad (3.60)$$

I (3.57)–(3.60) įeinančios reikšmės:

$\Delta x_i = x'_i - x_i$ ,  $\Delta y_i = y'_i - y_i$ ,  $x_i$ ,  $y_i$  – senojo geodezinio tinklo punktų koordinatės,  $x'_i$ ,  $y'_i$  – naujojo geodezinio tinklo punktų koordinatės,  $i=1, 2, \dots, n$  – punktų numeriai,  $x_{S_i}$ ,  $y_{S_i}$  – geodezinio tinklo punktų koordinatės nuokrypiai nuo jų vidurkio,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  – bloko poslinkiai abscisių ir ordinačių kryptimis,  $\omega$  – bloko posūkis,  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  – santykinės linijinės deformacijos,  $\varepsilon_{xy}$  – santykinė šlyties deformacija.

Mažiausiųjų kvadratų metodu įvertinamas deformacijų parametrų vektorius [167, 192]:

$$T = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot \Delta X. \quad (3.61)$$

Turint (3.61) vektoriaus reikšmes, vidutinė struktūrinio bloko dilatacija  $\Delta$  apskaičiuojama pagal (3.15) formulę.

Didžiausiojo ir mažiausiojo santykinio pailgėjimo bloke reikšmės [167, 192]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\Delta \pm \Gamma), \quad (3.62)$$

čia

$$\Gamma = \sqrt{(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})^2 + (2 \cdot \varepsilon_{xy})^2}. \quad (3.63)$$

Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis [96, 167, 192]:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}} \right). \quad (3.64)$$

Turint geodezinio tinklo punktų plokštumos koordinatės horizontaliuosius poslinkius, Žemės plutos homogeninius deformacijų parametrus baigtiniame elemente (trikampyje) galima apskaičiuoti ir pagal [35] darbe pateiktą metodiką. Žemės plutos horizontaliąsias deformacijas galima nustatyti taikant taškų poslinkio vienalytėje bei izotropinėje dvimatėje erdvėje modelį [35]:

$$X = S \cdot M, \quad (3.65)$$

čia

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix}, \quad (3.66)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & x_{S1} & y_{S1} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_{S2} & y_{S2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_{S3} & y_{S3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{S1} & y_{S1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{S2} & y_{S2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{S3} & y_{S3} \end{bmatrix}, \quad (3.67)$$

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \epsilon_{xx} \\ \frac{1}{2} \cdot \epsilon_{xy} - \omega \\ \alpha_y \\ \frac{1}{2} \cdot \epsilon_{xy} + \omega \\ \epsilon_{yy} \end{bmatrix}, \quad (3.68)$$

čia  $X$  – punktų plokštumos koordinačių poslinkių vektorius,  $S$  – punktų plokštumos koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica,  $M$  – horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrų vektorius,  $\Delta x_i = x'_i - x_i$ ,  $\Delta y_i = y'_i - y_i$ ,  $x_i, y_i$  – pirmojo matavimo punktų plokštumos koordinatės,  $x'_i, y'_i$  – antrojo matavimo punktų plokštumos koordinatės,  $i=1,2,...,n$  – punktų numeriai,  $x_{S_i}, y_{S_i}$  – geodezinio tinklo punktų plokštumos koordinačių nuokrypiai nuo jų vidurkio,  $\alpha_x, \alpha_y$  – baigtinio elemento (bloko) poslinkiai abscisių ir ordinačių kryptimis,  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$  – santykinės linijinės deformacijos,  $\epsilon_{xy}$  – santykinės šlyties deformacijos,  $\omega$  – baigtinio elemento posūkis.

Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrų rezultatų vektorius apskaičiuojamas [35]:

$$M = S^{-1} \cdot X . \quad (3.69)$$

Tačiau pagal [35] darbe pateiktas (3.66, 3.67, 3.69) formules horizontaliųjų Žemės plutos judesių deformacijų parametrus galima apskaičiuoti baigtinio elemento plotui, kuris šiuo atveju yra trikampis.

Sudarant baigtinių elementų tinklą trikampiais, ne visuomet galima tiksliai ir detalai atsižvelgti į tiriamojo regiono tektoninės sandaros savybes bei ypatumus, jei tai nebuvo atlikta projektuojant ir įrengiant geodezinio tinklo gruntinius punktus. Tada baigtinių elementų tinklas modeliuojamas įtraukiant ir kitas daugiakampes geometrines figūras arba blokines struktūras.

Tiriant Žemės plutos horizontaliuosius judesius bei atliekant dabartinių geodinaminių procesų analizę – [35] darbe pateiktą metodiką reikėtų išplėsti, t. y. pritaikyti geodezinio tinklo, sudaryto iš blokinių struktūrų ar jų fragmentų, horizontaliųjų deformacijų parametrus skaičiuoti ir įvertinti.

Blokinės struktūros punktų plokštumos koordinačių poslinkių vektorius [188]:

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_i \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_i \end{bmatrix} . \quad (3.70)$$

Punktų plokštumos koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica [188]:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & x_{S1} & y_{S1} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Si} & y_{Si} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{S1} & y_{S1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{Si} & y_{Si} \end{bmatrix} . \quad (3.71)$$

Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrų vektorius įvertinamas mažiausiųjų kvadratų metodu [188]:

$$M = (S^T \cdot S)^{-1} \cdot S^T \cdot X . \quad (3.72)$$

Baigtinio elemento santykinė dilatacija, svarbiausios horizontaliosios deformacijos, didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis apskaičiuojama naudojant (3.15, 3.62–3.64) formules.

Nustatytos Žemės plutos judesių horizontaliosios deformacijos siejamos su baigtinio elemento (bloko) svorio centru.

### 3.2. ŽEMĖS PLUTOS TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ POKYČIŲ SKAIČIAVIMO METODIKA

Siūloma metodika Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčiams nustatyti pagal geodezinių matavimų duomenis.

Įvertinant Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčių kaitą pagal geodezinius matavimus reikia taikyti koordinačių sistemų atžvilgiu invariantiškus analizės metodus. Šiuo metu plačiausiai taikoma tenzorinės analizės metodika [3, 7, 9, 23, 50, 70, 76, 95, 153, 164, 188, 193, 194, 202, 220, 223, 228, 232, 233].

Pagal geodezinių matavimų duomenis nėra galimybės nustatyti absoliučiuųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių nuo deformacijų atsiradimo pradžios. Tegalima nustatyti tik deformacijų pokytį per tam tikrą laiko tarpą nuo pradinių iki kartotinių matavimų. Todėl, remiantis geodezinių matavimų rezultatais ir funkcinė deformacijų bei tektoninių įtempių priklausomybe [7, 9, 29, 47, 59, 115, 153, 164, 202], galima apskaičiuoti tektoninių įtempių pokyčius per laikotarpį tarp kartotinių matavimų.

Turint apskaičiuotas horizontaliąsias santykinės linijines bei šlyties deformacijas, gali būti įvertinti tektoninių įtempių pokyčiai, t. y. nustatyti įtempių pokyčiai per tam tikrą laiko tarpą.

Tektoniniams įtempiams modeliuoti horizontaliojoje plokštumoje gali būti pritaikytas atvirkštinis Huko dėsnis, įtempius išreiškus deformacijomis (esant plokštuminiam įtempių būviui, įtempiai:  $\sigma_{xz} = 0$ ,  $\sigma_{yz} = 0$ ,  $\sigma_{zz} = 0$ ) [9, 153, 164, 194, 220]:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_{xx} + \nu \cdot \epsilon_{yy}) , \\ \sigma_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_{yy} + \nu \cdot \epsilon_{xx}) , \\ \sigma_{xy} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \epsilon_{xy} , \end{cases} \quad (3.73)$$

čia  $E$  – Jungo (tamprumo) modulis  $\left(7 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$  [6, 77, 149],  $\nu$  – Puasono koeficientas

(0,25),  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  – normaliniai įtempiai,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$  – tangentiniai įtempiai.

Tampriojo kūno mechaniniai rodikliai susiję [9, 28, 47, 226]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (3.74)$$

čia  $G$  – šlyties modulis.

Mechaniniai rodikliai ( $G$ ,  $E$ ,  $\nu$ ) nepriklauso nei nuo kūno taško koordinačių (vienalytiškumo prielaida), nei nuo pasirinktų koordinačių ašių krypčių (izotropiškumo prielaida).

Remiantis bendruoju Huko dėsnio (3.27) formulę galima užrašyti (deformaciją  $\varepsilon_{zz}$  išreiškus normaliniais įtempiais ( $\varepsilon_{xz} = 0$ ,  $\varepsilon_{yz} = 0$ ,  $\varepsilon_{zz} \neq 0$ )) [9, 193, 220]:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}). \quad (3.75)$$

Šios lygtys galioja izotropiniam kūnui, t. y. tokiam, kurio mechaninės savybės visomis kryptimis yra vienodos.

Fizines priklausomybes (3.73) galima užrašyti matricine forma [28, 53, 115, 202]:

$$\boldsymbol{\sigma} = K \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3.76)$$

čia

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{xy} \end{bmatrix}^T, \quad (3.77)$$

$$K = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (3.78)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}^T, \quad (3.79)$$

čia  $\boldsymbol{\sigma}$  – tektoninių įtempių vektorius,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų vektorius,  $K$  – standumo matrica.

Pagal tangentinių įtempių dualumo dėsnį [9, 164]  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ . Tada tektoninių įtempių horizontaliojoje plokštumoje būvis nusakomas simetriniu įtempių tenzoriumi [9, 29, 53, 115, 202]:

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}. \quad (3.80)$$

čia  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  – antrojo rango įtempių tenzorius.

Antrojo rango įtempių tenzorius  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  yra invariantinis koordinačių sistemos atžvilgiu, t. y. nepriklauso nuo koordinačių sistemos parinkimo.

Svarbiausieji tektoniniai įtempiai apskaičiuojami iš kvadratinės lygties [9, 213]:

$$\sigma^2 - I_1 \cdot \sigma + I_2 = 0, \quad (3.81)$$

kuri gaunama išskleidus determinantą [7, 9]:

$$\det \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{vmatrix} = 0, \quad (3.82)$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}, \quad (3.83)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{vmatrix}, \quad (3.84)$$

čia  $\sigma$  – svarbiausieji įtempiai,  $I_1$ ,  $I_2$  – įtempių tenzoriaus invariantai.

Išsprendus kvadratinę lygtį (3.81) gaunamos dvi tikrosios šaknys –  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ ), t. y.  $\sigma_1$  – maksimalus svarbiausiasis įtempis,  $\sigma_2$  – minimalus svarbiausiasis įtempis.

### 3.3. IŠVADOS

1. Sudarytas algoritmas horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tenzoriams ir pagrindiniams rodikliams (didžiausiam santykiniam pailgėjimui ir jo kryptčiai, mažiausiam pailgėjimui, dilatacijai, kryptčių ir kampų pokyčiams) apskaičiuoti pagal afiniojo geodezinių tinklų koordinatų perskaičiavimo ryšio lygčių koeficientus. Deformacijų tenzorių elementai ir deformacijų rodikliai įvertinami baigtinių elementų metodu.

2. Sudarytas algoritmas horizontaliesiems Žemės plutos judesiams tirti pagal geodezinius matavimus naudojant trikampių kraštinių ilgių pokyčius. Taikant siūlomą metodiką horizontaliųjų deformacijų rodikliai nustatomi išvengiant tinklo išlyginimo bei koordinatų skaičiavimo paklaidų.

3. Sudaryta apibendrintųjų horizontaliųjų Žemės plutos judesių rodiklių nustatymo metodika pagal geodezinių tinklų pakartotinius matavimus.

4. Žemės plutos tektoninių įtempių pokyčiams įvertinti pritaikyta tenzorinė skaičiavimo metodika. Tektoninių įtempių pokyčiams modeliuoti horizontalioje plokštumoje siūloma taikyti atvirkštinį Huko dėsnį.

5. Pagal apibrėžtas Žemės plutos tektoninių įtempių kitimo tendencijas galima detaliau ir tiksliau nustatyti dabartinę tektoninių struktūrų aktyvumą, nes atsižvelgiama į teritorijos fizines, struktūrines bei mechanines savybes. Platesnės gautų rezultatų interpretavimo galimybės geotektoniniu požiūriu, nes gautieji skaičiavimo duomenys išreiškiami ne santykiniu dydžiu – kaip horizontaliųjų deformacijų parametrai bei jų įverčiai, o jėgos vienetais, tenkančiais ploto vienetui.

## **4. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJŲ JUDESIŲ TYRIMAS IR REZULTATŲ ANALIZĖ**

### **4.1. LIETUVOS TERITORIJOS HORIZONTALIŲJŲ ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ TRENDŲ SKLAIIDOS STRUKTŪRA**

Prieš pereinant prie detalios horizontaliųjų Žemės plutos judesių analizės Ignalinos atominės elektrinės regione, būtina išnagrinėti ir nustatyti bendruosius horizontaliųjų Žemės plutos judesių fono dėsniumus Lietuvos teritorijoje.

Horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas galima nustatyti lyginant geodezinių tinklų punktų koordinačių ar kitų tinklo elementų pokyčius, gautus po tam tikro laiko atlikus pakartotinius matavimus.

Lietuvoje šiems tyrimams galima naudoti 1926–1940 m. ir pirmaisiais pokario metais sudarytus pirmosios bei antrosios klasės trianguliacijos tinklus ir kosminės geodezijos metodais 1992–1994 m. sudarytą nulinės bei pirmosios klasės geodezinį GPS tinklą. Nulinės ir pirmosios klasės GPS tinklo 45 punktai sutampa su trianguliacijos punktais (žr. 2.2 poskyrį).

Horizontalieji Žemės plutos judesiai Lietuvos teritorijoje nagrinėti [172, 174, 175, 176, 177] darbuose, taikant tenzorinę analizę apskaičiuoti deformacijų parametrai. Tačiau hipotezės apie horizontaliųjų deformacijų sklaidos struktūrą pateikiamos tik remiantis vizualia euristine analize ir nepagrįstos objektyviais matematiniais statistiniais kriterijais.

#### **4.1.1. Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų charakteristikos**

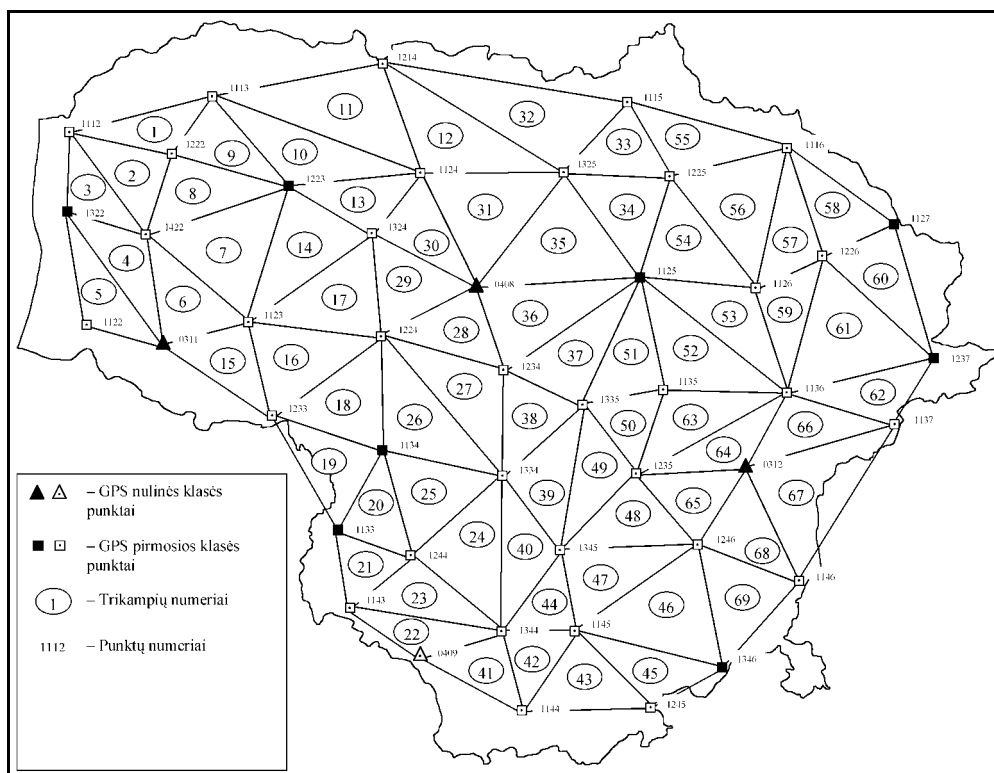
Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tyrimams panaudoti šio darbo 2.2 poskyrio 2.1 lentelėje pateikti pradiniai duomenys. Turint 45 bendrus trianguliacijos ir GPS punktus, suformuota pakartotų matavimų tinklo schema (4.1 pav.) Lietuvos teritorijos horizontaliosioms deformacijoms skaičiuoti [192]. Remiantis pakartotinių matavimų duomenimis sudaryti 69 trikampiai, kurie traktuojami kaip baigtiniai elementai. Norint patikrinti turimų duomenų [174] patikimumą, pakartotų matavimų trikampių tinklas sudarytas kitoks, kaip [174] darbe.

Trikampiams sudaryti panaudota: 4 nulinės klasės punktai (Akmeniškiai 0311, Dainavėlė 0409, Šašeliai 0408, Meškonys 0312) ir 41 pirmosios klasės GPS punktas. Pagal (3.1–3.18 (žr. 3.1 poskyrį)) formules apskaičiuoti trikampių horizontaliųjų deformacijų rodikliai pateikiami 4.1 lentelėje.

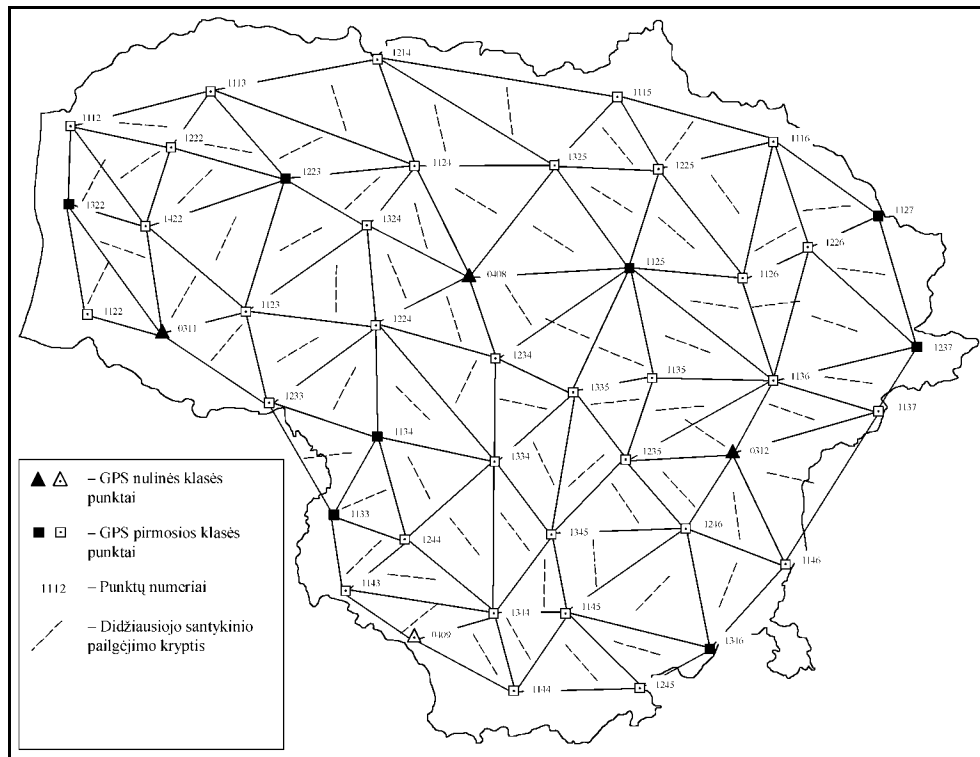
Svarbiausių deformacijų didžiausiojo santykinio pailgėjimo vyraujančios kryptys vakarinėje Lietuvos dalyje yra iš pietvakarių į šiaurės rytus, o rytinėje dalyje – iš pietryčių į šiaurės vakarus (4.2 pav.).

Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi vyrauja teigiamos deformacijų reikšmės (4.1 lentelė). Iš 69 trikampių – 57 trikampių deformacijos teigiamos, o 12 – neigiamos. Didžiausios neigiamos deformacijos yra: 3 trikampyje ( $-5,54 \cdot 10^{-6}$ ), 33 trikampyje ( $-1,23 \cdot 10^{-6}$ ) ir 11 trikampyje ( $-1,01 \cdot 10^{-6}$ ). Didžiausios teigiamos deformacijos – 45 trikampyje ( $15,19 \cdot 10^{-6}$ ), 69 trikampyje ( $14,41 \cdot 10^{-6}$ ), 27 trikampyje ( $12,04 \cdot 10^{-6}$ ), 64 trikampyje ( $9,86 \cdot 10^{-6}$ ). Didžiausiojo pailgėjimo kryptimi deformacijos kinta nuo  $-5,54 \cdot 10^{-6}$  (3 trikampis) iki  $15,19 \cdot 10^{-6}$  (45 trikampis). Pagrindinis neigiamų deformacijų arealas – šiaurinėje Lietuvos dalyje, Linkuvos kalvagūbrio aplinkoje.

Svarbiausių deformacijų mažiausiojo pailgėjimo kryptys yra statmenos didžiausiojo pailgėjimo kryptims. Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi vyrauja neigiamos deformacijų reikšmės (4.1 lentelė). Iš 69 trikampių – 63 trikampių deformacijos neigiamos, o 6 – teigiamos. Mažiausiojo pailgėjimo kryptimi deformacijos kinta nuo  $-29,42 \cdot 10^{-6}$  (45 trikampis) iki  $1,46 \cdot 10^{-6}$  (27 trikampis).



4.1 pav. Geodezinio tinklo schema



4.2 pav. Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptys

4.1 lentelė. Horizontaliosios Žemės plutos deformacijos

| Nr. | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ | $\varphi^\circ$ | $\Delta \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma_1 \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma_2 \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma \cdot 10^{-6}$ |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1   | 0,87                          | -6,44                         | 95              | -5,57                  | 7,21                     | -1,26                    | 7,32                   |
| 2   | 2,87                          | -7,64                         | 55              | -4,77                  | 3,44                     | 9,94                     | 10,52                  |
| 3   | -5,54                         | -6,74                         | 28              | -12,29                 | -0,68                    | 0,99                     | 1,20                   |
| 4   | 0,11                          | -9,25                         | 110             | -9,14                  | 7,16                     | -6,02                    | 9,36                   |
| 5   | 1,09                          | -0,71                         | 26              | 0,38                   | -1,11                    | 1,41                     | 1,80                   |
| 6   | 2,70                          | -0,62                         | 30              | 2,08                   | -1,66                    | 2,87                     | 3,32                   |
| 7   | 2,01                          | -0,71                         | 25              | 1,30                   | -1,74                    | 2,09                     | 2,72                   |
| 8   | 3,93                          | -6,04                         | 45              | -2,11                  | 0,14                     | 9,97                     | 9,97                   |
| 9   | 0,27                          | -4,52                         | 100             | -4,25                  | 4,51                     | -1,65                    | 4,80                   |
| 10  | -0,48                         | -1,03                         | 63              | -1,51                  | 0,32                     | 0,45                     | 0,56                   |
| 11  | -1,01                         | -12,36                        | -18             | -13,37                 | -9,23                    | -6,61                    | 11,35                  |
| 12  | -0,54                         | -11,22                        | -13             | -11,75                 | -9,66                    | -4,56                    | 10,68                  |
| 13  | 1,25                          | -3,64                         | 47              | -2,40                  | 0,40                     | 4,87                     | 4,89                   |
| 14  | 0,67                          | -3,37                         | 61              | -2,70                  | 2,17                     | 3,42                     | 4,05                   |
| 15  | 2,82                          | 0,87                          | 40              | 3,69                   | -0,35                    | 1,92                     | 1,95                   |
| 16  | 2,66                          | -0,14                         | 59              | 2,51                   | 1,30                     | 2,48                     | 2,80                   |
| 17  | 0,40                          | -0,90                         | 1               | -0,50                  | -1,30                    | 0,04                     | 1,30                   |
| 18  | 2,31                          | 0,47                          | 27              | 2,78                   | -1,07                    | 1,49                     | 1,84                   |
| 19  | 2,44                          | 1,40                          | 83              | 3,84                   | 1,01                     | 0,26                     | 1,04                   |
| 20  | 2,34                          | -3,12                         | 67              | -0,78                  | 3,74                     | 3,98                     | 5,47                   |
| 21  | -0,85                         | -3,60                         | 46              | -4,45                  | 0,06                     | 2,75                     | 2,75                   |
| 22  | 0,01                          | -2,73                         | 51              | -2,72                  | 0,61                     | 2,68                     | 2,75                   |

## 4.1 lentelės tęsinys

| Nr. | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ | $\varphi^\circ$ | $\Delta \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma_1 \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma_2 \cdot 10^{-6}$ | $\Gamma \cdot 10^{-6}$ |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 23  | 1,89                          | -2,30                         | 96              | -0,41                  | 4,10                     | -0,87                    | 4,19                   |
| 24  | -0,17                         | -0,51                         | -38             | -0,69                  | -0,09                    | -0,33                    | 0,34                   |
| 25  | 1,50                          | -0,81                         | -27             | 0,68                   | -1,35                    | -1,87                    | 2,31                   |
| 26  | 2,18                          | -0,61                         | 135             | 1,57                   | 0,01                     | -2,79                    | 2,79                   |
| 27  | 12,04                         | 1,46                          | 26              | 13,50                  | -6,42                    | 8,41                     | 10,58                  |
| 28  | 7,41                          | -6,39                         | -18             | 1,02                   | -11,07                   | -8,25                    | 13,81                  |
| 29  | 3,64                          | -2,19                         | -23             | 1,45                   | -4,08                    | -4,16                    | 5,83                   |
| 30  | 3,73                          | 0,75                          | -15             | 4,47                   | -2,58                    | -1,50                    | 2,98                   |
| 31  | 2,09                          | -2,17                         | 121             | -0,09                  | 2,04                     | -3,74                    | 4,26                   |
| 32  | -0,52                         | -7,04                         | -7              | -7,57                  | -6,32                    | -1,61                    | 6,52                   |
| 33  | -1,23                         | -4,89                         | -40             | -6,12                  | -0,68                    | -3,60                    | 3,66                   |
| 34  | 2,60                          | -5,02                         | 122             | -2,42                  | 3,23                     | -6,90                    | 7,62                   |
| 35  | 2,58                          | -2,12                         | 123             | 0,46                   | 1,94                     | -4,28                    | 4,70                   |
| 36  | 3,28                          | -8,82                         | -33             | -5,54                  | -4,98                    | -11,03                   | 12,10                  |
| 37  | 7,16                          | -7,57                         | 114             | -0,41                  | 9,69                     | -11,11                   | 14,74                  |
| 38  | 3,77                          | -1,17                         | 102             | 2,61                   | 4,52                     | -1,99                    | 4,94                   |
| 39  | 3,62                          | -0,45                         | -26             | 3,17                   | -2,50                    | -3,21                    | 4,07                   |
| 40  | 3,22                          | -2,42                         | -37             | 0,80                   | -1,57                    | -5,42                    | 5,64                   |
| 41  | 4,01                          | -4,86                         | -31             | -0,85                  | -4,09                    | -7,87                    | 8,87                   |
| 42  | 4,53                          | -5,11                         | -30             | -0,59                  | -4,70                    | -8,41                    | 9,64                   |
| 43  | 3,95                          | -5,25                         | -41             | -1,30                  | -1,40                    | -9,09                    | 9,20                   |
| 44  | 1,96                          | -4,85                         | 1               | -2,89                  | -6,80                    | 0,33                     | 6,80                   |
| 45  | 15,19                         | -29,42                        | 106             | -14,23                 | 38,16                    | -23,10                   | 44,61                  |
| 46  | 0,06                          | -27,63                        | 44              | -27,58                 | -0,80                    | 27,67                    | 27,69                  |
| 47  | 2,45                          | -5,13                         | -4              | -2,68                  | -7,52                    | -1,02                    | 7,58                   |
| 48  | 3,19                          | 0,81                          | -34             | 4,00                   | -0,92                    | -2,19                    | 2,38                   |
| 49  | 0,89                          | -2,12                         | 48              | -1,23                  | 0,27                     | 3,00                     | 3,02                   |
| 50  | -0,36                         | -3,83                         | 84              | -4,19                  | 3,40                     | 0,71                     | 3,47                   |
| 51  | 1,89                          | -3,79                         | 112             | -1,90                  | 4,02                     | -4,02                    | 5,68                   |
| 52  | 1,84                          | -3,42                         | 111             | -1,58                  | 3,86                     | -3,58                    | 5,26                   |
| 53  | 1,60                          | -0,80                         | 99              | 0,79                   | 2,28                     | -0,73                    | 2,40                   |
| 54  | 1,40                          | -2,93                         | 131             | -1,53                  | 0,55                     | -4,29                    | 4,33                   |
| 55  | 0,51                          | -1,71                         | 35              | -1,19                  | -0,79                    | 2,08                     | 2,22                   |
| 56  | 1,56                          | -0,67                         | -36             | 0,89                   | -0,70                    | -2,11                    | 2,23                   |
| 57  | -0,23                         | -1,11                         | 60              | -1,34                  | 0,43                     | 0,78                     | 0,89                   |
| 58  | 0,01                          | -4,45                         | 84              | -4,44                  | 4,36                     | 0,90                     | 4,45                   |
| 59  | 2,14                          | -1,59                         | 83              | 0,55                   | 3,64                     | 0,85                     | 3,74                   |
| 60  | 6,66                          | -4,11                         | 98              | 2,54                   | 10,30                    | -3,15                    | 10,77                  |
| 61  | 3,46                          | -1,20                         | 109             | 2,26                   | 3,67                     | -2,87                    | 4,66                   |
| 62  | 1,51                          | -1,19                         | 98              | 0,32                   | 2,61                     | -0,71                    | 2,70                   |
| 63  | -0,41                         | -2,69                         | 84              | -3,09                  | 2,24                     | 0,45                     | 2,28                   |
| 64  | 9,86                          | -2,06                         | 124             | 7,80                   | 4,50                     | -11,04                   | 11,92                  |
| 65  | 3,06                          | -1,17                         | -43             | 1,89                   | -0,26                    | -4,23                    | 4,24                   |
| 66  | 5,09                          | -3,51                         | 109             | 1,58                   | 6,85                     | -5,20                    | 8,60                   |
| 67  | -0,59                         | -3,50                         | 102             | -4,09                  | 2,66                     | -1,19                    | 2,91                   |
| 68  | 0,30                          | -1,18                         | -8              | -0,89                  | -1,43                    | -0,38                    | 1,48                   |
| 69  | 14,41                         | -20,62                        | 21              | -6,21                  | -26,11                   | 23,35                    | 35,03                  |

Dilatacija kinta nuo  $-27,58 \cdot 10^{-6}$  (46 trikampis) iki  $13,50 \cdot 10^{-6}$  (27 trikampis). Neigiamos dilatacijos reikšmės yra 42 trikampių (teritorija mažėja), teigiamos – 27 trikampių (4.1 lentelė).

Deformacijos pagal abscisių ašį kinta nuo  $-26,11 \cdot 10^{-6}$  (69 trikampis) iki  $38,16 \cdot 10^{-6}$  (45 trikampis). 32 trikampių deformacijos pagal ordinačių ašį yra neigiamos, o 37 trikampių – teigiamos (4.1 lentelė).

Deformacijos pagal ordinačių ašį kinta nuo  $-23,10 \cdot 10^{-6}$  (45 trikampis) iki  $27,67 \cdot 10^{-6}$  (46 trikampis). 41 trikampio deformacijos pagal abscisių ašį yra teigiamos, o 28 trikampių – neigiamos (4.1 lentelė).

Atsižvelgiant į trianguliacijos ir GPS matavimų tikslumą [175], nustatyta, kad Lietuvos teritorijoje dilatacijos nustatymo vidutinė kvadratinė paklaida yra  $\approx 4 \cdot 10^{-6}$  [167], o svarbiausių deformacijų nustatymo vidutinė kvadratinė paklaida –  $\approx 3 \cdot 10^{-6}$  [167].

Dilatacijos kitimo amplitudės reikšmė yra apie 10 kartų didesnė už nustatymo vidutinę kvadratinę paklaidą (4.1 lentelė).

Svarbiausių deformacijų kryptimis didžiausiojo santykinio pailgėjimo amplitudės reikšmė yra apie 7 kartus didesnė, o mažiausiojo santykinio pailgėjimo amplitudės reikšmė apie 10 kartų didesnė už jų nustatymo vidutines kvadratinės paklaidas (4.1 lentelė).

Tiriant Žemės plutos judesius pagal trianguliacijos ir GPS matavimų duomenis galima nustatyti tik bendras horizontaliųjų Žemės plutos judesių tendencijas, o apie atskirų skaitmeninių rodiklių reikšmių patikimumą spręsti sunku.

Tyrimų rezultatai rodo, kad horizontaliosios Žemės plutos deformacijos Lietuvos teritorijoje pasižymi sistemingaisiais dėsningumais. Tai neprieštarauja anksčiau atliktiems tyrimams [174]. Geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų parametrų pasiskirstymas ir deformacijų vidutinių rodiklių reikšmės (4.2 lentelė) koreliuojasi su [174] darbe atliktų tyrimų rezultatais. Todėl galima daryti išvadą, kad rezultatai yra objektyvūs.

**4.2 lentelė.** Dilatacijos ir svarbiausių teigiamų ir neigiamų deformacijų rodiklių vidutinių reikšmių palyginimas

| Horizontaliųjų deformacijų rodiklių vidutinės reikšmės | Tinklo schemos        |                      |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
|                                                        | [174]                 | (4.1 pav.)           |
| Teigiamų deformacijų didžiausiojo pailgėjimo kryptimi  | $4,1 \cdot 10^{-6}$   | $3,2 \cdot 10^{-6}$  |
| Neigiamų deformacijų didžiausiojo pailgėjimo kryptimi  | $-1,2 \cdot 10^{-6}$  | $-1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Teigiamų deformacijų mažiausiojo pailgėjimo kryptimi   | $0,7 \cdot 10^{-6}$   | $1,0 \cdot 10^{-6}$  |
| Neigiamų deformacijų mažiausiojo pailgėjimo kryptimi   | $-11,2 \cdot 10^{-6}$ | $-4,6 \cdot 10^{-6}$ |
| Teigiamos dilatacijos                                  | $4,5 \cdot 10^{-6}$   | $2,6 \cdot 10^{-6}$  |
| Neigiamos dilatacijos                                  | $-5,9 \cdot 10^{-6}$  | $-4,4 \cdot 10^{-6}$ |

#### 4.1.2. Horizontaliųjų deformacijų struktūrinis modelis

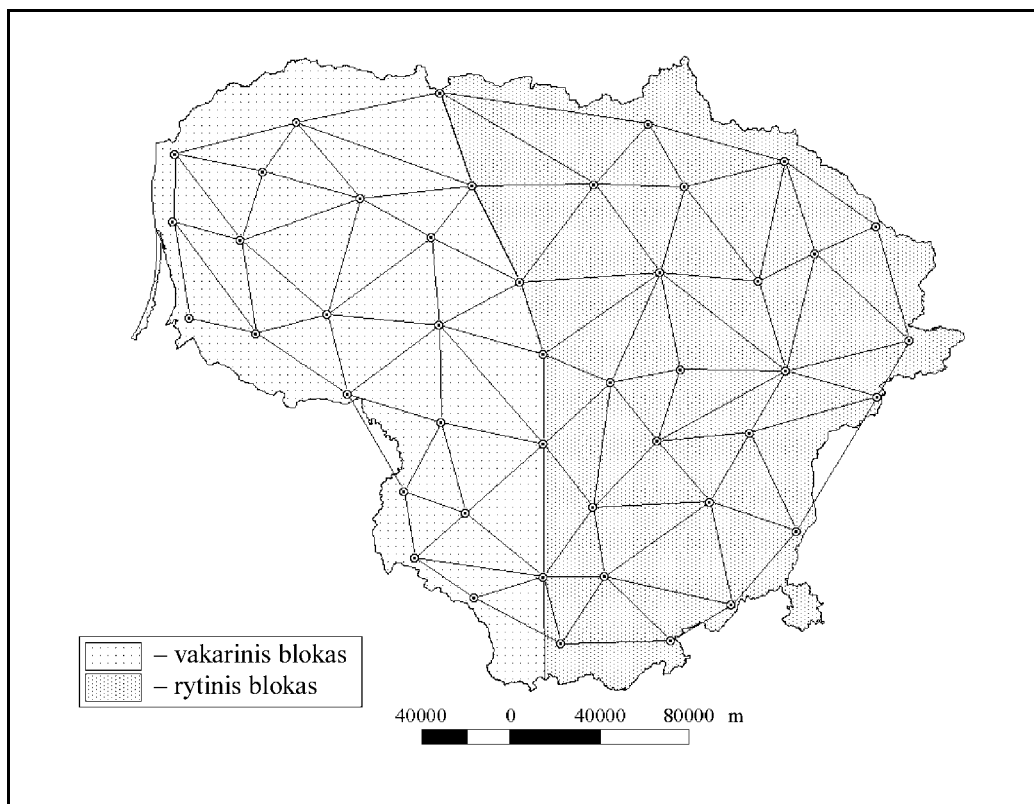
Išanalizavus ir įvertinus horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas, matyti, kad svarbiausių deformacijų didžiausiojo pailgėjimo kryptys atsikartoja dėsningai: vakarinėje Lietuvos dalyje – iš pietvakarių į šiaurės rytus, o rytinėje dalyje – iš pietryčių į šiaurės vakarus (4.2 pav.).

Tolimesnei analizei atlikti sudarytas preliminarus horizontaliųjų deformacijų struktūrinis modelis. Lietuvos teritorijoje išskirti du blokai: vakarinis ir rytinis (4.3 pav.) [192].

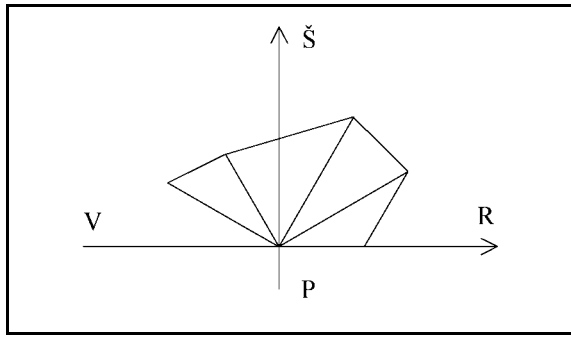
Vakarinio bloko vyraujančios didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptys pavaizduotos 4.4 paveiksle, rytinio – 4.5 paveiksle.

Krypčių schemas sudarytos išdėstant redukuotas didžiausiojo pailgėjimo kryptis į tam tikrus intervalus. Intervalai parinkti pagal krypčių pasiskirstymo tankumą.

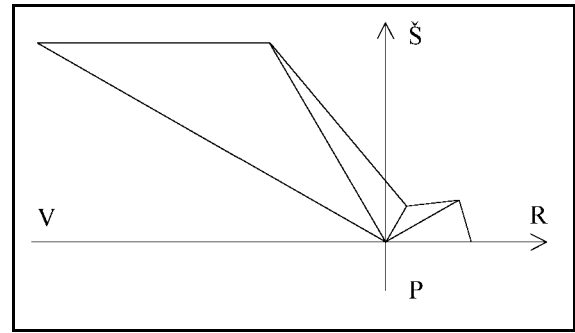
Remiantis vizualine svarbiausių deformacijų krypčių analize (4.4 ir 4.5 pav.) iškelta hipotezė, kad didžiausiojo pailgėjimo kryptys vakarinėje ir rytinėje teritorijos dalyje yra skirtingos [192].



4.3 pav. Horizontaliųjų deformacijų struktūrinis modelis



**4.4 pav.** Vakarinio bloko didžiausiojo pailgėjimo krypčių schema



**4.5 pav.** Rytinio bloko didžiausiojo pailgėjimo krypčių schema

Hipotezės pagrįstumui įvertinti atlikta vienfaktorė dispersinė analizė naudojantis 4.1 lentelėje pateiktais duomenimis [27, 120, 123, 212, 230].

Faktorinė dispersija (vidurkių  $\tilde{x}_i$  nuokrypių nuo bendro rezultato vidurkio  $\tilde{x}$  matas) [192]:

$$S_1^2 = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\tilde{x}_i - \tilde{x})^2 = 20091,8, \quad (4.1)$$

$$\tilde{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (4.2)$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} x_{ij}, \quad (4.3)$$

čia  $n$  – trikampių skaičius struktūriniame bloke,  $m$  – struktūrinių blokų skaičius,  $N$  – bendras trikampių skaičius.

Liekamoji dispersija ( $x_{ij}$  – nuokrypių nuo  $\tilde{x}_i$  matas) [192]:

$$S_2^2 = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \tilde{x}_i)^2 = 2073,6. \quad (4.4)$$

Statistinis kriterijus [192]:

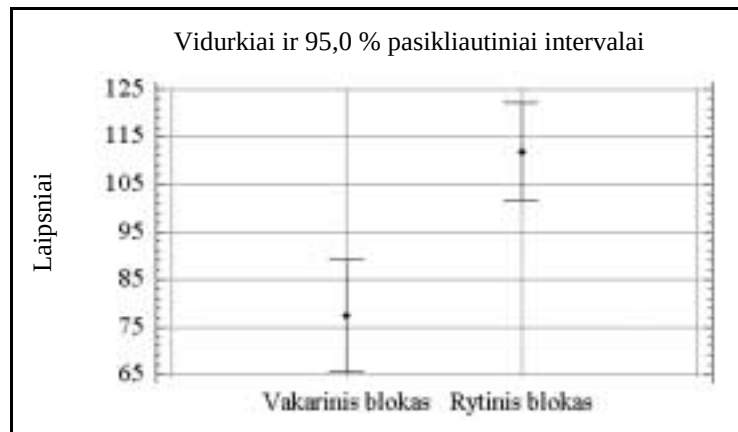
$$F_{eks.} = \frac{S_1^2}{S_2^2} = 9,69. \quad (4.5)$$

Fišerio pasiskirstymo reikšmių lentelėje, atitinkančioje reikšmingumo lygmenį 0,05,  $S_1^2$  laisvės laipsnių skaičių  $2-1=1$  ir  $S_2^2$  laisvės laipsnių skaičių  $69-2=67$  atitinka  $F_{krit.} = 3,99$  [26].

Kaip matyti,  $F_{eks.} > F_{krit.}$  ( $9,69 > 3,99$ ), todėl hipotezę, kad sudarant struktūrinį modelį neturi įtakos svarbiausių deformacijų didžiausiojo pailgėjimo kryptys, reikia atmesti.

Vidutinės vakarinio ir rytinio bloko didžiausiojo pailgėjimo krypčių reikšmės ir jų pasikliautinųjų intervalų ribos pavaizduotos 4.6 paveiksle.

Tai su 0,95 tikimybe patvirtina hipotezę, kad horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų didžiausiojo pailgėjimo kryptys vakarinėje ir rytinėje teritorijos dalyje yra skirtingos.



**4.6 pav.** Didžiausiojo pailgėjimo krypčių vidutinės reikšmės ir pasikliautiniai intervalai

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų struktūrinio modelio vakarinio ir rytinio blokų apibendrintąsias charakteristikas galima įvertinti mažiausių kvadratų metodu, taikant laisvojo taškų poslinkio tolygiai besideformuojančioje dvimatėje erdvėje modelį [96, 192].

Apibendrintosios struktūrinio horizontaliųjų deformacijų modelio charakteristikos apskaičiuotos pagal (3.57)–(3.64) formules (3.1 poskyris), naudojant 4.1 pav. atvaizduoto tinklo kartotinių matavimų rezultatus.

Vakarinio bei rytinio blokų horizontaliųjų deformacijų reikšmės pateiktos 4.3 lentelėje.

#### 4.3 lentelė. Apibendrintosios struktūrinio modelio horizontaliųjų deformacijų reikšmės

| Blokas    | $\varepsilon_{xx}$    | $\varepsilon_{yy}$    | $\varepsilon_{xy}$    | $\Delta$              | $\varepsilon_1$       | $\varepsilon_2$       | $\varphi^\circ$ |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| Vakarinis | $-0,65 \cdot 10^{-6}$ | $-0,07 \cdot 10^{-6}$ | $-0,28 \cdot 10^{-6}$ | $-0,72 \cdot 10^{-6}$ | $0,04 \cdot 10^{-6}$  | $-0,76 \cdot 10^{-6}$ | 77              |
| Rytinis   | $-0,65 \cdot 10^{-6}$ | $-1,06 \cdot 10^{-6}$ | $-0,58 \cdot 10^{-6}$ | $-1,71 \cdot 10^{-6}$ | $-0,24 \cdot 10^{-6}$ | $-1,48 \cdot 10^{-6}$ | 117             |

##### 4.1.3. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir kristalinio pamato struktūrinės tektoninės sandaros sąsajos

Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir kristalinio pamato struktūrinių tektoninių savybių sąsajoms nustatyti apskaičiuotų deformacijų (4.1 lentelė) generalizuotų reikšmių schema palyginta su [40] darbe pateikta Lietuvos teritorijos kristalinio pamato struktūrine tektonine schema.

Sudarytos apskaičiuotų deformacijų (dilatacijos (4.7 pav.), didžiausiojo santykinio pailgėjimo (4.8 pav.), mažiausiojo santykinio pailgėjimo (4.9 pav.), baigtinių elementų (trikampių) poslinkio modulio (4.10 pav.)) izogramos.

Lietuvos kristalinio pamato tektoninėje struktūroje išskirtos dvi sritys – vakarų ir rytų [40]. Vakarinę užima Vakarų Lietuvos granulitų masyvas. Šioje dalyje didžiausiojo deformacijų santykinio pailgėjimo vyraujančios kryptys yra iš pietvakarių į šiaurės rytus. Apibendrinto didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis  $77^\circ$  (4.3 lentelė). Ji statmena kristaliniame pamate esančiai stambiai kristalinio pamato lūžių zonai.

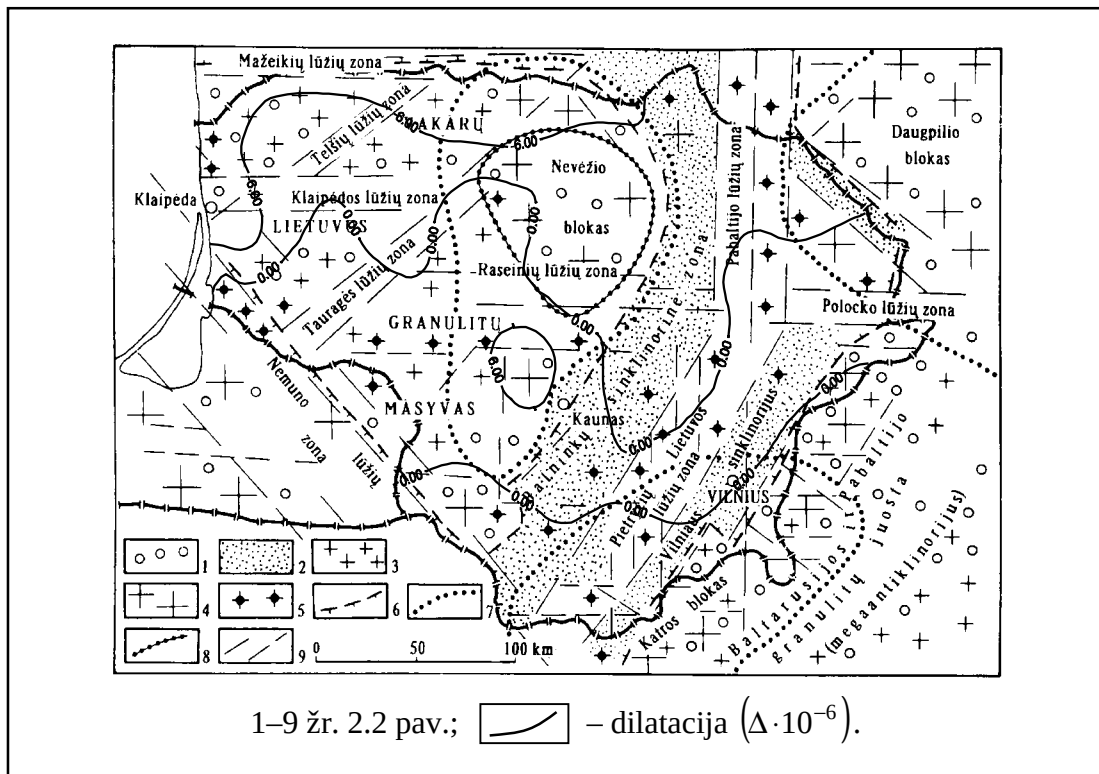
Rytinėje Lietuvos dalyje iš šiaurės į pietvakarius tęsiasi sudėtingos sandaros Dzūkijos – Aukštaitijos kristalinio pamato struktūra. Apibendrinto didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis šiame regione – iš pietryčių į šiaurės vakarus ( $117^\circ$  (4.3 lentelė)). Ši kryptis statmena Pietryčių Lietuvos kristalinio pamato lūžių bei Vilniaus ir Balninkų sinklinorijų zonoms.

Taip pat didžiausiojo pailgėjimo kryptys skirtinguose blokuose yra beveik lygiagrečios su įstrižosiomis didesnio neotektoninio aktyvumo [137] zonomis.

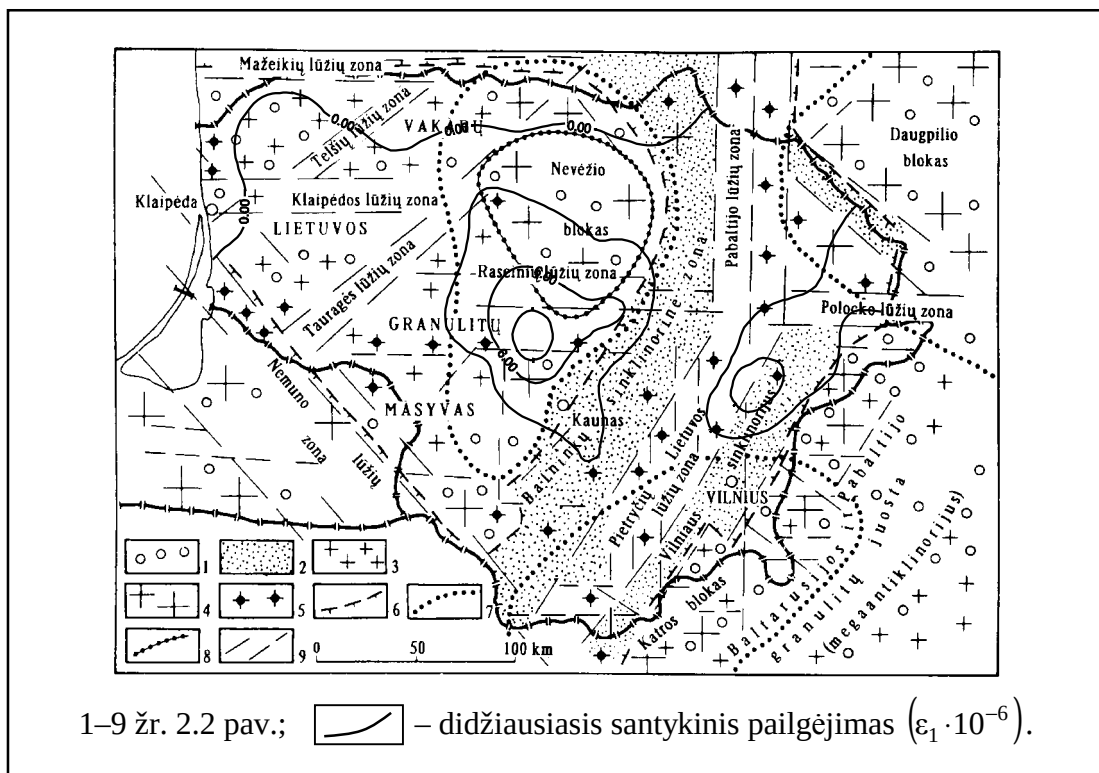
Dilatacija labiau (4.7 pav.) kinta Telšių lūžių zonoje, Tauragės lūžių zonos šiaurinėje dalyje bei Raseinių lūžių zonoje.

Intensyvesnis didžiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmių kitimas (4.8 pav.) ties giliųjų litosferos blokų ribomis. Ypač išsiskiria Raseinių lūžių zonoje. Mažesnis jų kitimas nustatytas Raseinių, Pabaltijo, Pietryčių Lietuvos ir Polocko lūžių zonų sandūroje.

Didesnis mažiausiojo santykinio pailgėjimo kitimas (4.9 pav.) Klaipėdos ir Telšių lūžių zonų sandūroje ir tęsiasi iki Telšių ir Mažeikių lūžių zonų sandūros. Išskirtinas Nevėžio bloko arealas bei Pietryčių Lietuvos lūžių zonos pietinė dalis.



**4.7 pav.** Kristalinio pamato struktūrinės tektoninės schemos [40] ir dilatacijos palyginimas



**4.8 pav.** Kristalinio pamato struktūrinės tektoninės schemos [40] ir didžiausiojo pailgėjimo reikšmių palyginimas



Poslinkio modulio didesnis reikšmių kitimas (4.10 pav.) stebimas Telšių lūžių zonoje, Pietryčių Lietuvos lūžių zonoje bei Nevėžio bloko areale, ypač praeinančioje Raseinių lūžių zonoje.

Apibendrinus horizontaliųjų deformacijų kitimą, reikėtų išskirti giliųjų litosferos blokų ribų arealą, kuriame deformacijų parametrų kitimas didžiausias.

Atlikus tyrimų analizę nustatyta, kad:

- pagal išmatuotų geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų matematinės statistinės analizės rezultatus su 0,95 tikimybe galima teigti, kad apibendrintą deformacijų struktūrinį modelį sudaro du skirtingų deformacijų rodiklių savybių blokai: vakarinis ir rytinis;
- vakarinio bloko didžiausiojo pailgėjimo šiaurės krypties atžvilgiu vidutinė reikšmė  $77^\circ$ , o rytinio bloko –  $117^\circ$ ;
- vakarinio bloko didžiausių pailgėjimų kryptys yra statmenos Nemuno zonos kristalinio pamato lūžių kryptims, o rytinio – Pietryčių Lietuvos lūžių zonai bei Vilniaus sinklinorijui ir Balninkų sinklinorinei zonai bei beveik lygiagrečios su ištiržusiomis didesnio neotektoninio aktyvumo zonomis;
- svarbiausių deformacijų kryptys, atspindinčios pagal geodezinius matavimus nustatytą dabartinių tektoninių įtempių kryptis, siejasi su struktūrine tektonine Lietuvos teritorijos sandara. Tai rodo, kad struktūrinis horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų modelis atspindi dabartinius pagrindinius horizontaliųjų Žemės plutos judesių fono dėsningumus.

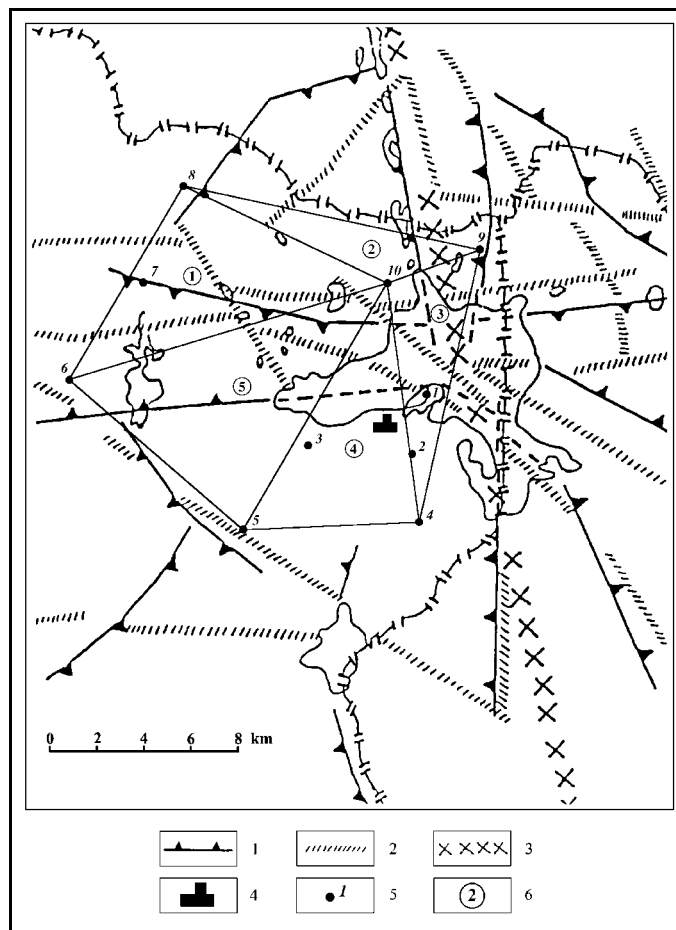
#### **4.2. ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIOSIOS DEFORMACIJOS IR JŲ SKLAIDA IGNALINOS ATOMINĖS ELEKTRINĖS GEODINAMINIO POLIGONO TERITORIJOJE**

Ignalinos atominės elektrinės teritorijoje yra trijų didelių kristalinio pamato lūžių zonų (Pietryčių Lietuvos, Pabaltijo, Polocko) sankirta. Kristalinis pamatas lūžių suskaldytas nevienodo dydžio blokais. Lūžiai ikiplatforminiai ir platforminiai. Regione yra stambių tektoninių struktūrų – Baltijos sineklizės, Latvijos balno ir Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės sandūra. Kristaliniam paviršiuje ryškios ir žemesnės eilės tektoninės struktūros [40]. Nuosėdinėje dangoje daug kur tie patys struktūriniai elementai kaip kristaliniam paviršiuje. Ryški kristalinio pamato struktūrinių elementų įtaka nuosėdinės dangos sluoksnių storių pasiskirstymui. Tai susiję su skirtingais vertikaliaisiais Žemės plutos judesiais ankstesniais geologiniais periodais. Kaip skirtingų Žemės plutos judesių pasekmė yra susidariusi ir nusistovėjusi nuosėdinės dangos sluoksnių struktūrinė ir kampinė nedarna. Pagal naujausius vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo duomenis, Ignalinos atominės elektrinės rajone konstatuotas dabartinis kristalinio pamato lūžių tektoninis aktyvumas [2, 166, 167]. Todėl

galima teigti, kad šiame Lietuvos regione dabartiniai geodinaminiai procesai yra susiję su anksčiau vykusiais, ir teritorija yra tektoniškai aktyvi.

Tiriant teritorijos geodinaminį aktyvumą, kuris yra vienas iš indikatorių įvertinant ekogeodinaminę riziką, labai svarbu nustatyti horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas, nes jos geriau atspindi Žemės plutos tektoninius įtempius negu vertikaliosios.

Horizontaliosioms Žemės plutos deformacijoms nustatyti naudotos geodinaminio poligono punktų koordinatės nustatytos GPS matavimais 1998 (pirmasis matavimas) ir 1999 (antrasis matavimas) metais (2.4 lentelė). Horizontaliosios Žemės plutos deformacijos apskaičiuotos pagal 3.1 poskyryje pateiktą tenzorinės analizės metodiką, deformacijų tenzorius komponentes įvertinant baigtinių elementų metodu. Teritorijos skirstymas trikampaiais baigtiniais elementais parodytas 4.11 paveiksle.



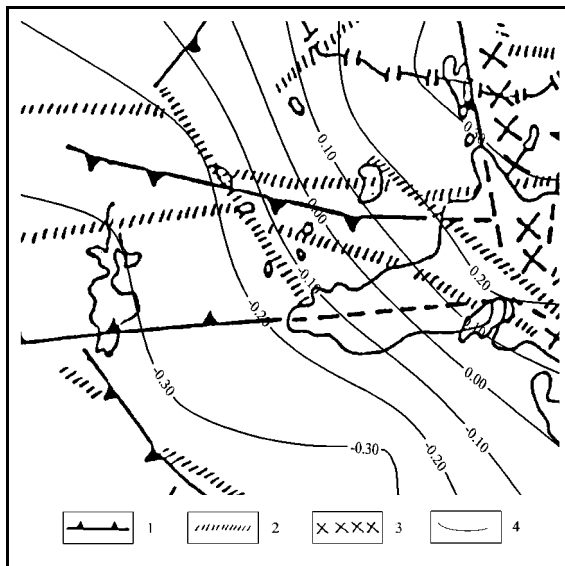
**4.11 pav.** Tektoninių lūžių išsidėstymo ir geodinaminio poligono schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje. Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – baigtinio elemento numeris

Žemės plutos deformacijoms įvertinti pasirinkti didžiausias bei mažiausias santykiniai pailgėjimai, dilatacija ir didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptis, nes šie parametrai tiesiogiai susiję su Žemės plutos tektoninių įtempių charakteristikomis. Svarbiausieji santykiniai pailgėjimai yra proporcingi įtempiams, o jų kryptys ir ženklai susiję su didžiausiojo bei mažiausiojo santykinųjų pailgėjimų kryptimis ir ženklais.

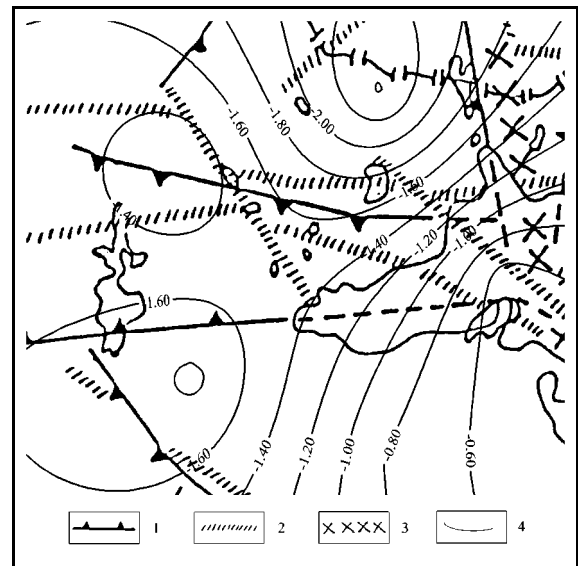
Pagal (3.13–3.15), (3.48–3.50) ir (3.62–3.64, 3.70–3.72) formules apskaičiuoti penkių geodinaminio poligono trikampių horizontaliųjų deformacijų parametrai, visais trimis būdais (3.1.1, 3.1.2 ir 3.1.4 poskyriai) gauti identiški rezultatai [2, 188, 190, 214]. Skaičiavimo rezultatai parodyti 4.4 lentelėje. Didžiausiojo bei mažiausiojo santykinio pailgėjimo, dilatacijos kartoschemos grafiškai pavaizduotos 4.12–4.14 paveiksluose.

**4.4 lentelė.** Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje apskaičiuoti pagal plokštuminių koordinačių skirtumus

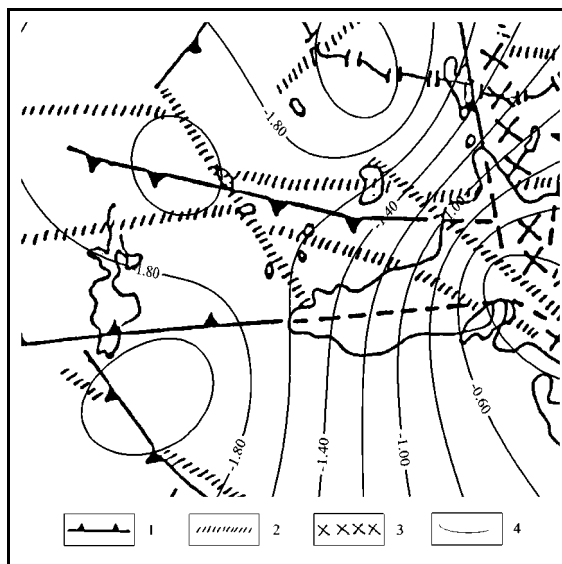
| Trikam-<br>pio Nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ | $\Delta \cdot 10^{-6}$ | $\varphi^\circ$ |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|
| 1                  | -1,19                            | -0,27                            | 0,11                             | -0,27                         | -1,19                         | -1,46                  | 3               |
| 2                  | -2,39                            | 0,24                             | 0,65                             | 0,28                          | -2,43                         | -2,15                  | 7               |
| 3                  | -0,51                            | 0,24                             | -0,04                            | 0,24                          | -0,51                         | -0,27                  | -1              |
| 4                  | -0,55                            | -0,53                            | -0,45                            | -0,32                         | -0,77                         | -1,09                  | -44             |
| 5                  | -1,54                            | -0,58                            | 1,25                             | -0,28                         | -1,85                         | -2,13                  | 26              |



**4.12 pav.** Didžiausiojo santykinio pailgėjimo kartoschema (1–3 – žr. 4.11 pav.; 4 – didžiausias santykinis pailgėjimas ( $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ ))



**4.13 pav.** Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kartoschema (1–3 – žr. 4.11 pav.; 4 – mažiausias santykinis pailgėjimas ( $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ ))



**4.14 pav.** Santykinės dilatacijos kartoschema (1–3 – žr. 4.11 pav.; 4 – santykinė dilatacija ( $\Delta \cdot 10^{-6}$ ))

Pagal 4.4 lentelės duomenis ir palyginus 4.11 bei 4.12–4.14 paveikslus galima pastebėti Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone dėsningumą.

Santykinės linijinės deformacijos, t. y.  $\varepsilon_{xx}$  nagrinėjamoje teritorijoje kinta nuo  $-0,51 \cdot 10^{-6}$  iki  $-2,39 \cdot 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  – nuo  $-0,58 \cdot 10^{-6}$  iki  $0,24 \cdot 10^{-6}$ , santykinės šlyties deformacijos – nuo  $-0,45 \cdot 10^{-6}$  iki  $1,25 \cdot 10^{-6}$ , didžiausiasis santykinis pailgėjimas – nuo  $-0,32 \cdot 10^{-6}$  iki  $0,28 \cdot 10^{-6}$ , o mažiausiasis – nuo  $-0,51 \cdot 10^{-6}$  iki  $-2,43 \cdot 10^{-6}$ , dilatacija – nuo  $-0,27 \cdot 10^{-6}$  iki  $-2,15 \cdot 10^{-6}$ .

Didžiausiasis santykinis pailgėjimas didėja iš pietvakarių į šiaurės rytus, o izolinijų kryptys ir jų pokyčiai pagal bendrąjį vaizdą koreliuojasi su tektoninių lūžių kryptimis. Pietvakarinėje dalyje didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimi yra tektoninio spaudimo zona. Pietrytinė kryptimi ji mažėja, o šiaurės rytinėje dalyje pereina į tempimo zoną.

Mažiausiojo santykinio pailgėjimo kitimas sudėtingesnis. Nustatyta ženkli anomalija pereinant nuo Drūkšių grabeno prie šiaurės Zarasų pakopos. Mažiausiasis santykinis pailgėjimas (4.13 pav.) absoliučiaja reikšme beveik visa eile didesnis už didžiausiąjį santykinį pailgėjimą (4. 12 pav.).

Santykinės dilatacijos reikšmės yra neigiamos (4.14 pav.). Tai rodo, kad teritorija – tektoninio spaudimo srityje.

Bendrosios Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone savybės siejasi su regioninėmis Žemės plutos deformacijomis šiaurės rytų Lietuvoje (4.1 poskyris) [189, 192].

Bendrosios horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių bei jų kaitos tiriamajame areale savybės išlieka panašios ir teritoriją trikampių formos baigtiniais elementais suskaidžius kitaip, nei parodyta 4.11 pav., įtraukus kitus poligono punktus [187], o taip pat horizontaliąsias deformacijas įvertinus pagal (3.56) lygčių sistemą naudojant 2.3 lentelės duomenis, t. y. kai deformacijų tenzorių elementams apskaičiuoti naudojami kraštinių ilgių pokyčiai.

Svarbiausių santykinų deformacijų bei santykinės dilatacijos skaitinės reikšmės apskaičiuotos naudojant išmatuotų kraštinių ilgių pokyčius pagal (3.56) lygčių sistemą pateiktos 4.5 lentelėje.

**4.5 lentelė.** Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje apskaičiuoti pagal santykinius linijų pailgėjimus

| Trikampio Nr. | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ | $\Delta \cdot 10^{-6}$ |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1             | -0,30                         | -1,30                         | -1,60                  |
| 2             | 0,04                          | -1,28                         | -1,24                  |
| 3             | -0,99                         | -1,20                         | -2,20                  |

Dilatacijos nustatymo vidutinis kvadratinis nuokrypis  $m_{\Delta} = \left( \frac{2\sqrt{3} \cdot m_k^2}{P} \right)^{\frac{1}{2}}$ , o svarbiausių deformacijų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai  $m_{\varepsilon} \approx 0,7 \cdot m_{\Delta}$  [167, 213]. Čia  $m_k$  – koordinacių pokyčių nustatymo baigtinio elemento ribose vidutinių kvadratinių nuokrypių vidutinė reikšmė (vidutinis baigtinio elemento tikslumas),  $P$  – baigtinio elemento plotas.

Svarbiausių santykinų deformacijų bei santykinės dilatacijos nustatymo vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai, atsižvelgiant į GPS matavimų tikslumą Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone [54], pateikti 4.6 lentelėje.

**4.6 lentelė.** Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų parametrų nustatymo tikslumas

| Trikampio Nr. | $m_k$ , mm | $P$ , km <sup>2</sup> | $m_{\Delta} \cdot 10^{-6}$ | $m_{\varepsilon} \cdot 10^{-6}$ |
|---------------|------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1             | 0,55       | 44,510                | 0,15                       | 0,10                            |
| 2             | 0,55       | 14,108                | 0,27                       | 0,19                            |
| 3             | 0,55       | 20,518                | 0,23                       | 0,16                            |
| 4             | 0,57       | 37,339                | 0,17                       | 0,12                            |
| 5             | 0,58       | 56,493                | 0,14                       | 0,10                            |

Santykinės dilatacijos kitimas yra apie 8 kartus didesnis už nustatymo maksimalų vidutinį kvadratinį nuokrypį (4.4 ir 4.6 lentelės).

Svarbiausių deformacijų kryptimis didžiausiojo santykinio pailgėjimo kitimo amplitudės reikšmė yra apie 3,2 karto didesnė už nustatymo maksimalų vidutinį kvadratinį nuokrypį. Tuo tarpu mažiausiojo santykinio pailgėjimo kitimas yra apie 12,8 karto didesnis už nustatymo maksimalų vidutinį kvadratinį nuokrypį (4.4 ir 4.6 lentelės).

Todėl galima teigti, kad nustatytų pagal GPS matavimų duomenis horizontaliųjų Žemės plutos judesių skaitmeninių rodiklių reikšmės galima naudoti geodinaminių procesų detaliai analizei atlikti.

Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių sklaidos ypatumai Ignalinos atominės elektrinės rajone bendrais bruožais atitinka rezultatus, gautus atliekant vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimus [2, 69, 110, 165, 166, 167, 168, 180, 181, 185, 196].

Taikant siūlomą horizontaliųjų Žemės plutos judesių deformacijų rodiklių įvertinimo metodiką bei skaičiavimo būdus, atlikti tyrimai ir nustatyta:

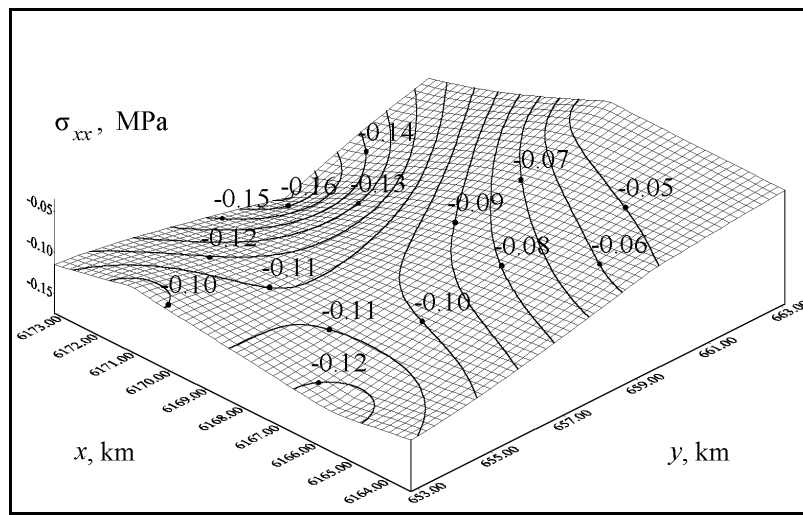
- pagal horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodiklių sklaidos Ignalinos atominės elektrinės rajone ypatumus galima teigti, kad Žemės plutos deformacijos susiję su tektonine teritorijos sandara;
- didžiausiojo santykinio pailgėjimo rodiklių reikšmės didėja iš pietvakarių į šiaurės rytus, o izolinių kryptys ir jų pokyčiai pagal bendrąjį vaizdą koreliuojasi su tektoninių lūžių kryptimis. Iš pietvakarių į šiaurės rytus iš spaudimo zonos pereinama į tempimo zoną;
- mažiausiojo santykinio pailgėjimo kryptimis deformacijos neigiamos ir jų intensyvumas apie 10 kartų didesnis negu didžiausiojo pailgėjimo kryptimis. Todėl santykinė teritorijos dilatacija visame nagrinėjamame areale neigiama, ir teritorija yra bendrojo tektoninio spaudimo zonoje.

#### **4.3. TEKTONINIŲ ŽEMĖS PLUTOS ĮTEMPIŲ POKYČIAI IGNALINOS ATOMINĖS ELEKTRINĖS RAJONE**

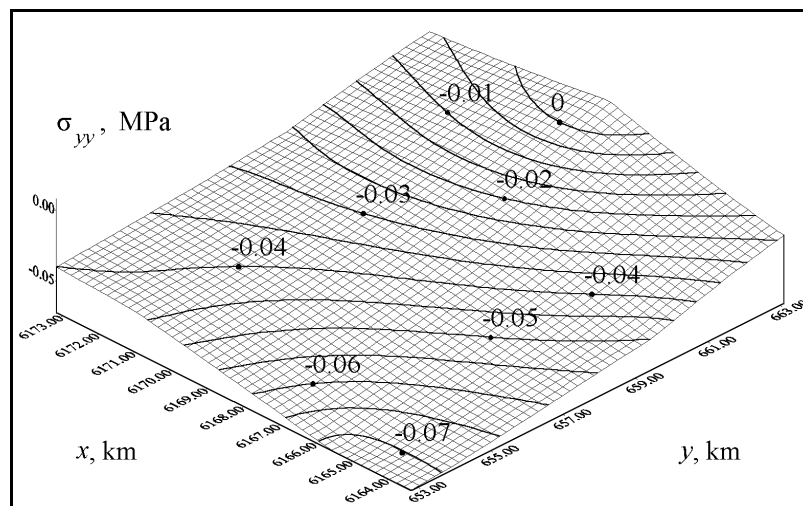
Taikant pateiktą metodiką (3.2 poskyris), pagal (3.73, 3.76–3.79) formules gauti nauji eksperimentinio tyrimo rezultatai – įvertinti geodinaminio poligono trikampių tektoninių įtempių pokyčiai tarp kartotinių matavimų [188]. Apskaičiuoti normalinių bei tangentinių įtempių pokyčiai pateikti 4.7 lentelėje, grafiškai tektoninių įtempių kitimas Ignalinos atominės elektrinės regione pavaizduotas 4.15–4.17 paveiksluose. Geodinaminio poligono schema bei sudarytas geodezinis tinklas parodytas 4.11 paveiksle.

**4.7 lentelė.** Tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje

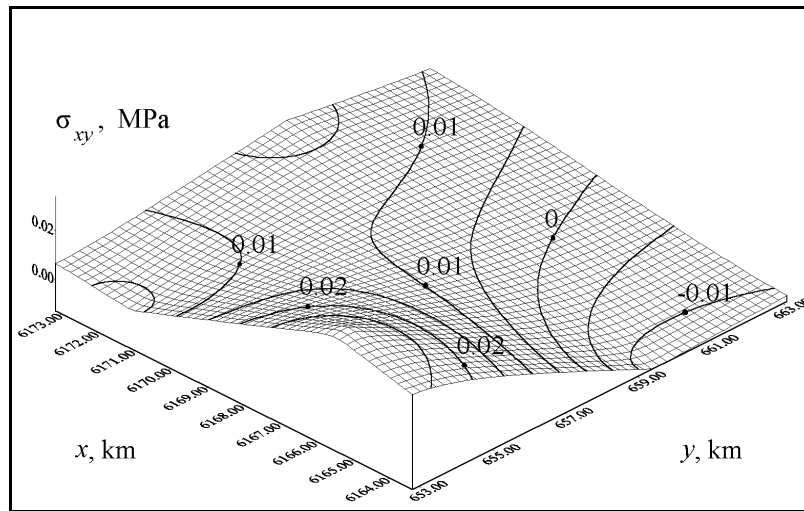
| Trikampio Nr. | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1             | -0,094              | -0,043              | 0,003               |
| 2             | -0,174              | -0,026              | 0,018               |
| 3             | -0,034              | 0,009               | -0,001              |
| 4             | -0,051              | -0,050              | -0,013              |
| 5             | -0,126              | -0,072              | 0,035               |



**4.15 pav.**  $\sigma_{xx}$  įtempių izograma



**4.16 pav.**  $\sigma_{yy}$  įtempių izograma



**4.17 pav.**  $\sigma_{xy}$  įtempių izograma

Normalinių įtempių  $\sigma_{xx}$  pokyčių kitimo ribos – nuo  $-0,034$  MPa iki  $-0,174$  MPa,  $\sigma_{yy}$  kinta nuo  $-0,072$  MPa iki  $0,009$  MPa, tangentinių įtempių pokyčiai – nuo  $-0,013$  MPa iki  $0,035$  MPa.

Iš gautųjų rezultatų matyti, kad teritorijoje vyksta akivaizdi Žemės plutos tektoninių įtempių kaita.

Pagal modeliavimo analizės rezultatus Ignalinos atominės elektrinės rajone pastebimi tam tikri Žemės plutos įtempių pokyčių pasiskirstymo dėsningumai. Jie susiję su teritorijos tektonine sandara [40, 84, 135].

Remiantis tyrimų duomenų analizės rezultatais galima daryti apibendrintas išvadas, kad regioninių struktūrų, Latvijos balno bei Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės sandūros zona yra aktyvi ir dabar, nes yra nustatytas tangentinių įtempių pokyčių mažėjimas, teigiamo ženklo įtempių pokyčiai Drūkšių grabeno aplinkoje įgyja neigiamas reikšmes (4.17 pav.), t. y. vyksta Žemės plutos bloko grimzdimas.

Palyginus gautus naujus tektoninių įtempių pokyčių duomenis su Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono tektoninės sandaros ypatumais nustatyta, kad:

- nustatant horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei tektoninių įtempių tarpusavio sąsajas bei kaitos dėsningumus gali būti taikoma invariantiška koordinačių sistemos atžvilgiu tenzorinės analizės metodika;
- taikant siūlomą plokštuminių įtempių įvertinimo metodiką nustatytos Žemės plutoje vykstančių dabartinių tektoninių bei lokaliųjų judesių geodinaminės tendencijos;
- tektoninių įtempių laukų charakteristikos praktiniu požiūriu yra labai svarbios ir aktualios prognozuojant tektoninių lūžių seismiškumą.

#### 4.4. HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ BEI TEKTONINIŲ ĮTEMPIŲ 2–D MODELIAVIMAS ANSYS PROGRAMA

Tiriant dabartinius horizontaliuosius Žemės plutos judesius geodeziniais metodais, pagal kartotinių matavimų duomenis nustatomi geodezinių punktų poslinkiai ir sutapatinami su Žemės plutos poslinkiais [2, 21, 37, 167, 175, 177, 214]. Geodezinių punktų poslinkiai randami pagal koordinačių pokyčius per laiko tarpą tarp geodezinių matavimų, taigi Žemės plutos poslinkių skaitinės reikšmės nustatomos tik pavieniuose retai išdėstytuose taškuose. Sudarant Žemės plutos deformacijų bei įtempių modelius, kituose taškuose deformacijų bei įtempių reikšmės apskaičiuojamos interpoliavimo būdu, dažniausiai taikant tiesinio interpoliavimo procedūras. Toks horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei įtempių nustatymo būdas turi nemažai trūkumų. Išmatuotos geodezinių punktų poslinkių reikšmės ir kryptys priklauso nuo pradinių taškų, kurie skaičiuojant poslinkius laikomi tvirtais, pasirinkimo. Apskaičiuojant Žemės plutos judesių reikšmes ne geodeziniuose punktuose geometrinio interpoliavimo būdu neįvertinamos mechaninės bei struktūrinės deformuojamojo kūno savybės, t. y. mechaninis deformacijų modelis.

Sudarant Žemės plutos deformacijų ir su jomis susijusių Žemės plutos įtempių kaitos modelius, tikslinga derinti tenzorinę analizę su mechaniniais fizinių kūnų deformacijų modeliais. Toks derinimas tiriamoje teritorijoje įmanomas modeliuojant deformacijų ir įtempių kaitą ANSYS programa [7] bei įvertinant jų reikšmes mechanikoje modeliavimo uždaviniams spręsti plačiai taikomu baigtinių elementų metodu [1, 12, 14, 16, 28, 53, 56, 77, 86, 93, 115, 118, 133, 142, 154, 160, 163, 202]. Taip gaunami detalūs Žemės plutos deformacijų ir įtempių kaitos modeliai, geriau atspindintys Žemės plutos deformacijų sąsajas su teritorijos tektonine sandara nei deformacijų reikšmės, apskaičiuotos tik taškuose, sutampančiuose su geodeziniais punktais.

Praktiniu pavyzdžiu horizontaliosioms deformacijoms ir tektoniniams įtempiams modeliuoti pasirinktas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas.

Pagal pateiktą skaičiavimo metodiką (3 skyrius) horizontaliosioms Žemės plutos deformacijoms bei įtempiams modeliuoti sudaryti penki plokštuminiai (2–D) geometrinio kūno modeliai. Taikytas baigtinių elementų metodas, darant prielaidą, kad pasirinktų riboto dydžio geometrinių elementų deformacijos yra izotropinio pobūdžio.

Pirmas dviejų dimensijų geometrinio kūno modelis sudarytas įtraukiant visus geodinaminio poligono gruntinius punktus, remiantis šiais punktais suformuotas baigtinių elementų tinklas, kurį sudaro 16 keturkampių (4.18 pav.) [184, 193].

Antram dviejų dimensijų geometrinio kūno modeliui sudaryti parinkti devyni gruntiniai punktai. Remiantis devyniais punktais (išskyrus 1) suformuotas baigtinių elementų tinklas, kurį sudaro 11 keturkampių (4.19 pav.) [184].

Trečias dviejų dimensijų geometrinio kūno modelis sudarytas iš 33 baigtinių elementų, baigtiniais elementais laikomi trikampiai. Modelis sudarytas įtraukiant visus geodinaminio poligono gruntinius punktus (4.20 pav.).

Ketvirtas geometrinio kūno modelis sudarytas naudojant keturis fiksuotus taškus bei devynis GPS punktus. Teritorija suskaldyta į 146 baigtinius elementus (trikampius). Tiriamąjį plotą sudaro 26 trikampiai (4.21 pav.) [194].

Penktas dviejų dimensijų geometrinio kūno modelis sudarytas naudojant keturis fiksuotus taškus ir devynis geodinaminio poligono gruntinius punktus. Teritorija suskaldyta į 120 baigtinių elementų (keturkampių), tiriamąjį plotą sudaro 17 keturkampių (4.22 pav.).

Kraštinės sąlygos apibrėžtos poslinkiais, ketvirto ir penkto modelių kontūro poslinkiai lygūs nuliui.

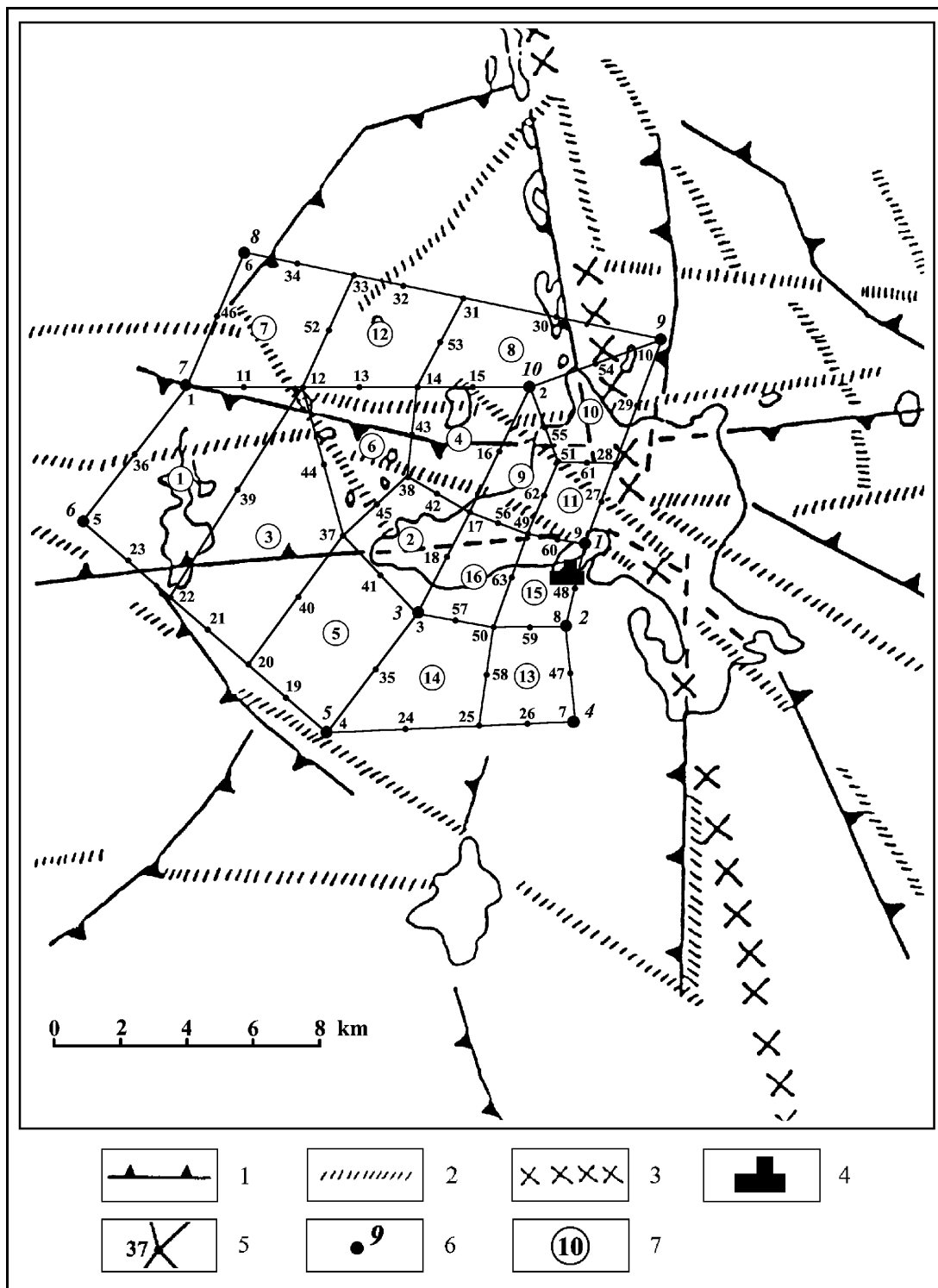
Nagrinėjamosios teritorijos skaidymas baigtiniais elementais, atsižvelgiant į pradinių taškų padėtis bei skaidymo sąlygas, atliktas naudojant ANSYS programą.

Poslinkiai geometriniame elemente pirmame, antrame bei penktame modeliuose nustatyti pagal (3.38) ir (3.39) formules, o trečiame ir ketvirtame modeliuose – pagal (3.34) ir (3.35) formules.

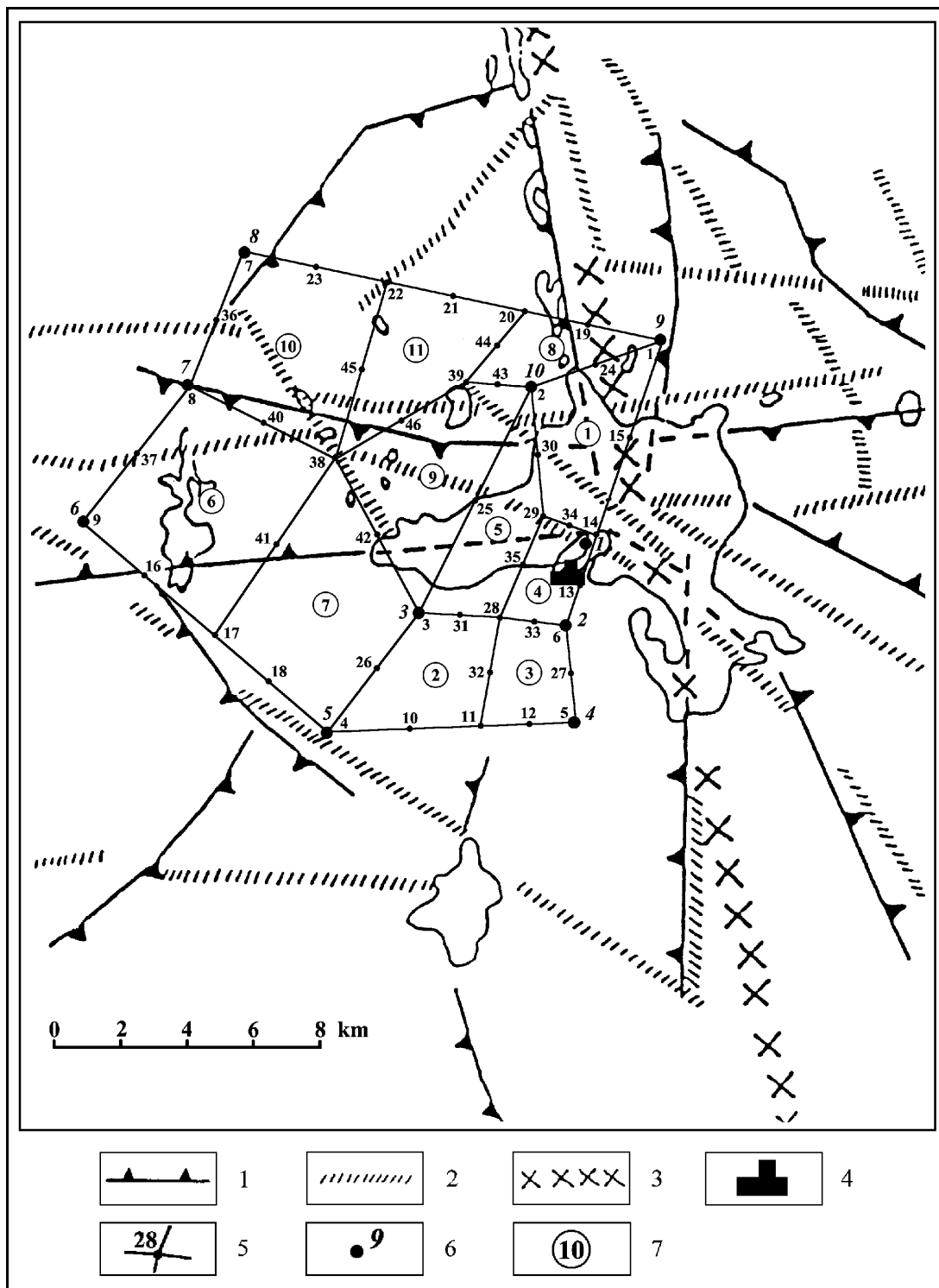
Geometrinių elementų mazginių taškų koordinatinių poslinkiai nustatyti baigtinių elementų metodu pagal GPS tinklo koordinatinių poslinkius, taikant ANSYS programą. Skaičiuojant mazginių taškų poslinkius, įvertinamas mechaninis izotropinio kūno plokštuminis deformacijų modelis.

Baigtinio elemento mazginiuose taškuose įvertintos: santykinės linijinės bei šlyties horizontaliosios Žemės plutos deformacijos, normalinių bei tangentinių tektoninių įtempių pokyčiai, svarbiausių tektoninių įtempių pokyčiai bei jų kryptys. Horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtempių pokyčių reikšmės pateiktos 4.8–4.12 lentelėse. Baigtinio elemento svarbiausių įtempių kryptys pavaizduotos 4.23–4.27 paveiksluose.

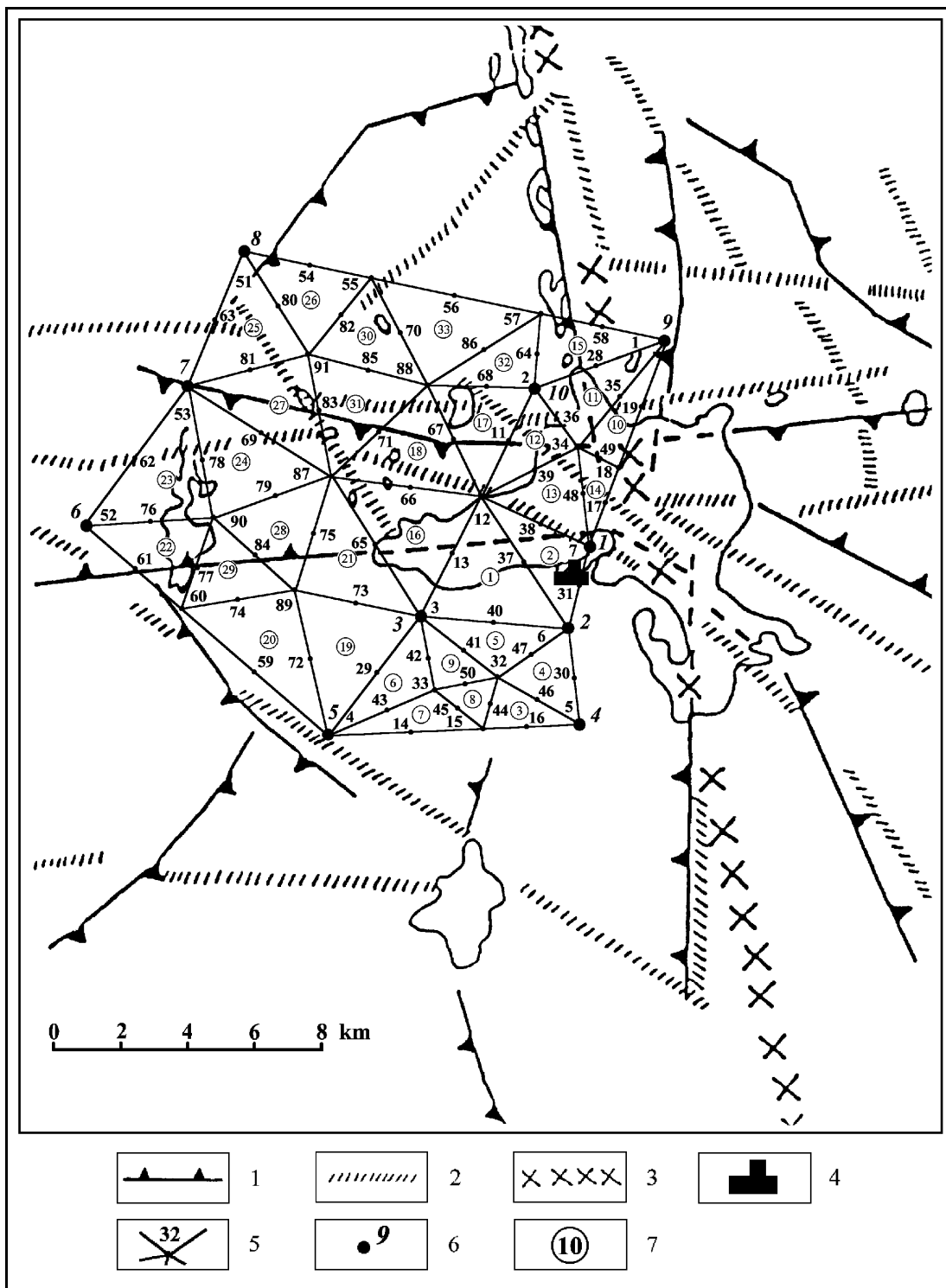
Santykinės linijinės deformacijos, t. y.  $\epsilon_{xx}$  Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje kinta nuo  $-3,14 \cdot 10^{-6}$  iki  $1,62 \cdot 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{yy}$  – nuo  $-5,42 \cdot 10^{-6}$  iki  $1,10 \cdot 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{zz}$  – nuo  $-0,20 \cdot 10^{-6}$  iki  $1,52 \cdot 10^{-6}$ , santykinės šlyties deformacijos – nuo  $-6,26 \cdot 10^{-6}$  iki  $4,37 \cdot 10^{-6}$ .



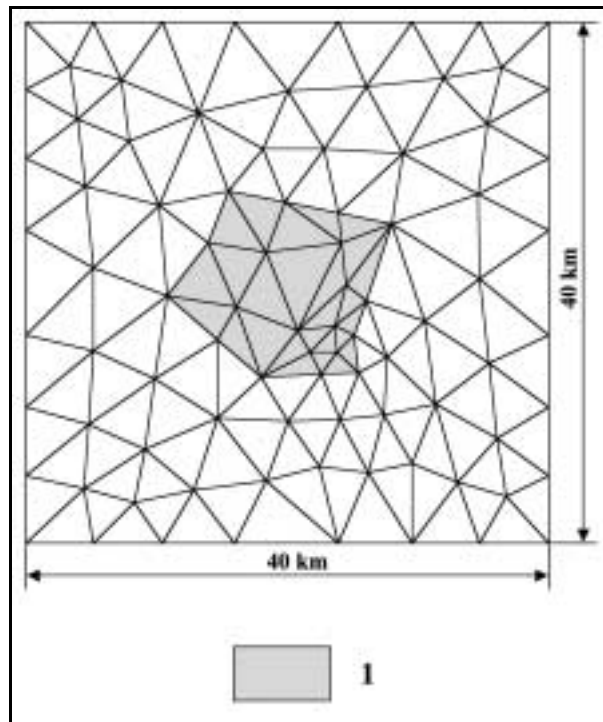
**4.18 pav.** Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baigtinių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 16 keturkampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – baigtinio elemento mazginis taškas, 6 – GPS punktas, 7 – baigtinio elemento numeris



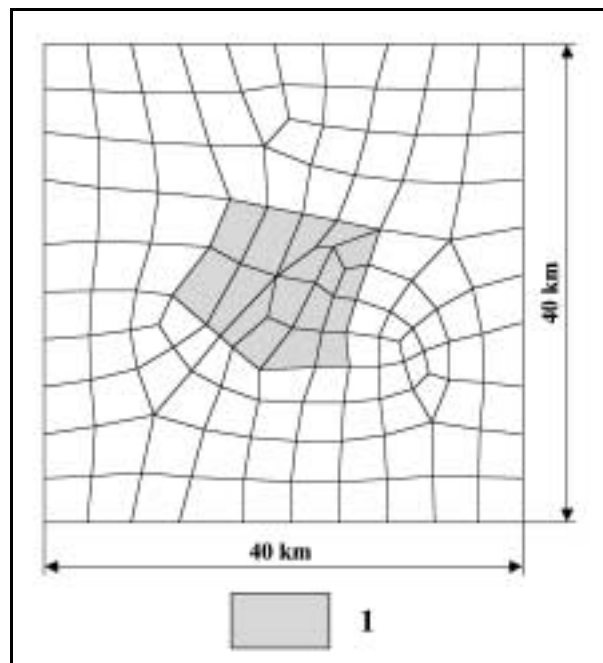
**4.19 pav.** Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baigtinių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 11 keturkampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – baigtinio elemento mazginis taškas, 6 – GPS punktas, 7 – baigtinio elemento numeris



**4.20 pav.** Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baigtinių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 33 trikampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – baigtinio elemento mazginis taškas, 6 – GPS punktas, 7 – baigtinio elemento numeris



**4.21 pav.** Baigtinių elementų tinklo schema (1 – Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorija, baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 26 trikampių)



**4.22 pav.** Baigtinių elementų tinklo schema (1 – Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorija, baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 17 keturkampių)

**4.8 lentelė.** Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje (rezultatai gauti panaudojant baigtinių elementų tinklą susidedantį iš 16 keturkampių)

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1                  | 0,56                             | 0,01                             | -0,19                            | -2,52                            | 0,042               | 0,011               | -0,071              | 0,099            | -0,046           |
| 2                  | -0,10                            | 0,01                             | 0,03                             | -0,87                            | -0,007              | -0,001              | -0,024              | 0,020            | -0,029           |
| 3                  | -0,75                            | 0,20                             | 0,18                             | -1,10                            | -0,053              | 0,001               | -0,031              | 0,015            | -0,067           |
| 4                  | 0,09                             | -1,94                            | 0,62                             | 0,31                             | -0,030              | -0,143              | 0,009               | -0,029           | -0,144           |
| 5                  | -1,65                            | 0,32                             | 0,44                             | 1,76                             | -0,117              | -0,007              | 0,049               | 0,012            | -0,136           |
| 6                  | 0,87                             | -5,42                            | 1,52                             | 3,46                             | -0,036              | -0,388              | 0,097               | -0,011           | -0,413           |
| 7                  | -3,14                            | -0,30                            | 1,15                             | 3,54                             | -0,240              | -0,081              | 0,099               | -0,034           | -0,288           |
| 8                  | 1,62                             | -1,69                            | 0,02                             | 2,81                             | 0,090               | -0,096              | 0,079               | 0,119            | -0,125           |
| 9                  | -1,95                            | 0,86                             | 0,36                             | -6,26                            | -0,129              | 0,028               | -0,175              | 0,141            | -0,243           |
| 10                 | 0                                | -0,45                            | 0,15                             | -0,29                            | -0,008              | -0,034              | -0,008              | -0,006           | -0,036           |
| 12                 | 0,28                             | -1,08                            | 0,27                             | 1,05                             | 0,001               | -0,075              | 0,029               | 0,011            | -0,085           |
| 14                 | -0,35                            | -0,07                            | 0,14                             | 0,15                             | -0,027              | -0,012              | 0,004               | -0,011           | -0,029           |
| 17                 | 0,03                             | -0,65                            | 0,21                             | 0,07                             | -0,010              | -0,048              | 0,002               | -0,010           | -0,048           |
| 20                 | 0,09                             | -0,41                            | 0,11                             | 1,59                             | -0,001              | -0,029              | 0,044               | 0,031            | -0,062           |
| 22                 | -0,44                            | 0,11                             | 0,11                             | -0,62                            | -0,031              | 0                   | -0,017              | 0,008            | -0,039           |
| 25                 | 0,20                             | 0,24                             | -0,14                            | 0,88                             | 0,019               | 0,021               | 0,025               | 0,045            | -0,004           |
| 28                 | 0,26                             | -0,05                            | -0,07                            | 0,76                             | 0,018               | 0,001               | 0,021               | 0,033            | -0,013           |
| 31                 | 0,18                             | 0,11                             | -0,09                            | 0,13                             | 0,015               | 0,011               | 0,004               | 0,017            | 0,009            |
| 33                 | -0,50                            | 1,10                             | -0,20                            | -0,44                            | -0,016              | 0,073               | -0,012              | 0,075            | -0,018           |
| 37                 | -0,03                            | -0,59                            | 0,20                             | -0,58                            | -0,013              | -0,044              | -0,016              | -0,006           | -0,051           |
| 38                 | -0,10                            | -0,51                            | 0,20                             | -0,19                            | -0,017              | -0,040              | -0,005              | -0,016           | -0,041           |
| 49                 | -0,30                            | -1,14                            | 0,48                             | 0,81                             | -0,044              | -0,091              | 0,023               | -0,035           | -0,100           |
| 50                 | -1,35                            | -0,20                            | 0,52                             | -0,61                            | -0,105              | -0,040              | -0,017              | -0,036           | -0,109           |
| 51                 | -0,05                            | 0,42                             | -0,12                            | -2,58                            | 0,004               | 0,031               | -0,072              | 0,091            | -0,056           |

**4.9 lentelė.** Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje (rezultatai gauti panaudojant baigtinių elementų tinklą susidedantį iš 11 keturkampių)

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1                  | 0,14                             | -0,90                            | 0,25                             | -0,91                            | -0,006              | -0,065              | -0,026              | 0,003            | -0,074           |
| 2                  | 0,03                             | -0,18                            | 0,05                             | -0,11                            | -0,002              | -0,013              | -0,003              | -0,001           | -0,014           |
| 3                  | -0,43                            | 0,01                             | 0,14                             | -0,44                            | -0,032              | -0,007              | -0,012              | -0,002           | -0,037           |
| 4                  | 0,40                             | -1,82                            | 0,48                             | 0,77                             | -0,004              | -0,129              | 0,022               | -0,001           | -0,132           |
| 5                  | -2,59                            | -0,22                            | 0,94                             | 4,37                             | -0,197              | -0,065              | 0,122               | 0,008            | -0,270           |
| 6                  | 0,29                             | -0,84                            | 0,18                             | 1,10                             | 0,006               | -0,058              | 0,031               | 0,019            | -0,070           |
| 7                  | 0,36                             | -4,26                            | 1,30                             | 3,03                             | -0,052              | -0,312              | 0,085               | -0,027           | -0,337           |
| 8                  | 0,54                             | -0,07                            | -0,16                            | -1,64                            | 0,039               | 0,005               | -0,046              | 0,071            | -0,027           |
| 9                  | -1,44                            | 0,17                             | 0,42                             | 1,44                             | -0,104              | -0,014              | 0,040               | 0,001            | -0,120           |
| 11                 | -0,14                            | 0,21                             | -0,02                            | 0,42                             | -0,007              | 0,013               | 0,012               | 0,018            | -0,012           |

#### 4.9 lentelės tęsinys

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 14                 | 0,24                             | -0,35                            | 0,04                             | -1,48                            | 0,011               | -0,022              | -0,042              | 0,039            | -0,050           |
| 17                 | -0,09                            | -0,07                            | 0,05                             | 0,48                             | -0,008              | -0,007              | 0,014               | 0,006            | -0,021           |
| 20                 | 0,09                             | 0,30                             | -0,13                            | 0,18                             | 0,013               | 0,024               | 0,005               | 0,026            | 0,011            |
| 22                 | -0,40                            | 0,88                             | -0,16                            | -0,05                            | -0,014              | 0,058               | -0,001              | 0,058            | -0,014           |
| 28                 | -0,93                            | -0,14                            | 0,36                             | 1,19                             | -0,072              | -0,027              | 0,033               | -0,010           | -0,090           |
| 29                 | 0,01                             | -1,04                            | 0,34                             | -0,60                            | -0,018              | -0,077              | -0,017              | -0,014           | -0,082           |
| 38                 | -0,04                            | -0,86                            | 0,30                             | 0,30                             | -0,019              | -0,065              | 0,008               | -0,018           | -0,066           |
| 39                 | -0,55                            | -0,10                            | 0,22                             | -0,20                            | -0,043              | -0,018              | -0,006              | -0,016           | -0,044           |

**4.10 lentelė.** Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje (rezultatai gauti panaudojant baigtinių elementų tinklą susidedantį iš 33 trikampių)

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1                  | -0,06                            | -0,32                            | 0,13                             | 0                                | -0,010              | -0,025              | 0                   | -0,010           | -0,025           |
| 2                  | -0,10                            | -0,03                            | 0,04                             | -0,72                            | -0,008              | -0,004              | -0,020              | 0,014            | -0,026           |
| 3                  | -0,92                            | 0,15                             | 0,26                             | -0,69                            | -0,066              | -0,006              | -0,019              | 0                | -0,072           |
| 4                  | 0,11                             | -1,47                            | 0,46                             | 0,50                             | -0,019              | -0,108              | 0,014               | -0,017           | -0,110           |
| 5                  | -2,96                            | 0,52                             | 0,81                             | 2,36                             | -0,211              | -0,016              | 0,066               | 0,004            | -0,232           |
| 6                  | -0,06                            | -1,01                            | 0,36                             | -0,10                            | -0,024              | -0,077              | -0,003              | -0,024           | -0,077           |
| 7                  | -0,88                            | 0,41                             | 0,16                             | -2,68                            | -0,058              | 0,014               | -0,075              | 0,062            | -0,105           |
| 12                 | -0,24                            | -0,27                            | 0,17                             | 0,29                             | -0,023              | -0,025              | 0,008               | -0,015           | -0,032           |
| 15                 | 0,16                             | -0,02                            | -0,04                            | 0,32                             | 0,011               | 0,001               | 0,009               | 0,017            | -0,004           |
| 18                 | -0,13                            | 0,44                             | -0,10                            | 0,12                             | -0,001              | 0,030               | 0,003               | 0,031            | -0,002           |
| 32                 | 0,10                             | -0,70                            | 0,20                             | 1,85                             | -0,006              | -0,051              | 0,052               | 0,028            | -0,085           |
| 33                 | -0,33                            | 0,14                             | 0,06                             | 0,46                             | -0,022              | 0,004               | 0,013               | 0,009            | -0,028           |
| 34                 | -0,28                            | 0,34                             | -0,02                            | -1,51                            | -0,014              | 0,021               | -0,042              | 0,049            | -0,043           |
| 51                 | 0,30                             | -3,92                            | 1,21                             | 1,66                             | -0,051              | -0,287              | 0,047               | -0,042           | -0,296           |
| 52                 | -1,29                            | 0,16                             | 0,38                             | 1,97                             | -0,093              | -0,012              | 0,055               | 0,016            | -0,121           |
| 53                 | 0,42                             | -0,32                            | -0,03                            | -0,93                            | 0,025               | -0,016              | -0,026              | 0,038            | -0,029           |
| 55                 | 0,20                             | 0,36                             | -0,19                            | -0,73                            | 0,022               | 0,031               | -0,021              | 0,048            | 0,006            |
| 57                 | 0,10                             | 0,01                             | -0,04                            | -0,23                            | 0,008               | 0,003               | -0,006              | 0,012            | -0,002           |
| 60                 | -0,53                            | 0,02                             | 0,17                             | 0,84                             | -0,039              | -0,008              | 0,023               | 0,004            | -0,052           |
| 87                 | -0,01                            | -0,51                            | 0,17                             | 0,40                             | -0,011              | -0,038              | 0,011               | -0,007           | -0,042           |
| 88                 | -0,27                            | -0,04                            | 0,10                             | 0,08                             | -0,021              | -0,008              | 0,002               | -0,008           | -0,021           |
| 89                 | 0,16                             | -0,76                            | 0,20                             | -0,07                            | -0,003              | -0,054              | -0,002              | -0,003           | -0,054           |
| 90                 | -0,26                            | -0,13                            | 0,13                             | -0,63                            | -0,022              | -0,014              | -0,018              | 0                | -0,036           |
| 91                 | -0,28                            | -0,20                            | 0,16                             | 1,53                             | -0,025              | -0,020              | 0,043               | 0,020            | -0,066           |

**4.11 lentelė.** Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje (rezultatai gauti panaudojant baigtinių elementų tinklą susidedantį iš 26 trikampių)

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1                  | 0,11                             | -0,36                            | 0,08                             | -0,50                            | 0,001               | -0,025              | -0,014              | 0,007            | -0,031           |
| 2                  | 0,11                             | -0,56                            | 0,15                             | 0,09                             | -0,002              | -0,039              | 0,003               | -0,002           | -0,040           |
| 6                  | -0,53                            | -0,20                            | 0,24                             | -0,01                            | -0,043              | -0,025              | 0                   | -0,025           | -0,043           |
| 7                  | -0,04                            | -0,10                            | 0,04                             | 0,63                             | -0,005              | -0,008              | 0,018               | 0,012            | -0,024           |
| 8                  | 0,36                             | -0,83                            | 0,16                             | -0,82                            | 0,012               | -0,055              | -0,023              | 0,019            | -0,062           |
| 9                  | 0,14                             | -0,63                            | 0,16                             | 0,13                             | -0,001              | -0,044              | 0,004               | -0,001           | -0,045           |
| 11                 | -0,44                            | 0,09                             | 0,12                             | 0,56                             | -0,031              | -0,001              | 0,016               | 0,005            | -0,038           |
| 12                 | -0,75                            | 0,65                             | 0,04                             | 0,54                             | -0,044              | 0,034               | 0,015               | 0,037            | -0,047           |
| 13                 | 0,05                             | -0,12                            | 0,02                             | 0,75                             | 0,002               | -0,008              | 0,021               | 0,018            | -0,024           |
| 21                 | 0                                | -0,46                            | 0,15                             | -0,11                            | -0,008              | -0,034              | -0,003              | -0,008           | -0,034           |
| 23                 | 0,04                             | -0,45                            | 0,13                             | -0,07                            | -0,005              | -0,033              | -0,002              | -0,005           | -0,033           |
| 29                 | -0,18                            | -0,58                            | 0,25                             | -1,60                            | -0,025              | -0,047              | -0,045              | 0,011            | -0,082           |
| 32                 | -0,39                            | 0,34                             | 0,02                             | 1,01                             | -0,023              | 0,018               | 0,028               | 0,032            | -0,038           |
| 35                 | 0                                | -0,31                            | 0,10                             | 1,34                             | -0,006              | -0,023              | 0,038               | 0,024            | -0,053           |
| 45                 | -0,26                            | -0,30                            | 0,18                             | 0,83                             | -0,025              | -0,027              | 0,023               | -0,003           | -0,049           |
| 46                 | 0,08                             | -0,48                            | 0,13                             | 0,14                             | -0,003              | -0,034              | 0,004               | -0,002           | -0,035           |
| 61                 | -0,95                            | -0,16                            | 0,37                             | 0,94                             | -0,074              | -0,030              | 0,026               | -0,018           | -0,086           |
| 62                 | -0,45                            | 0,24                             | 0,07                             | 2,23                             | -0,029              | 0,010               | 0,062               | 0,056            | -0,075           |
| 63                 | -0,61                            | 0,24                             | 0,12                             | 1,22                             | -0,041              | 0,006               | 0,034               | 0,024            | -0,059           |
| 64                 | 0,09                             | -0,71                            | 0,21                             | -0,65                            | -0,007              | -0,052              | -0,018              | 0                | -0,058           |

**4.12 lentelė.** Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje (rezultatai gauti panaudojant baigtinių elementų tinklą susidedantį iš 17 keturkampių)

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1                  | 0,07                             | -0,33                            | 0,09                             | -0,55                            | -0,001              | -0,023              | -0,016              | 0,007            | -0,031           |
| 2                  | 0,12                             | -0,56                            | 0,14                             | -0,28                            | -0,001              | -0,039              | -0,008              | 0                | -0,041           |
| 6                  | -0,18                            | -0,04                            | 0,07                             | -0,32                            | -0,014              | -0,006              | -0,009              | 0                | -0,020           |
| 7                  | 0,17                             | -0,50                            | 0,11                             | 0,60                             | 0,003               | -0,035              | 0,017               | 0,010            | -0,041           |
| 8                  | 0,30                             | -0,56                            | 0,09                             | -0,26                            | 0,012               | -0,036              | -0,007              | 0,013            | -0,038           |
| 9                  | 0,24                             | -0,46                            | 0,07                             | 0,18                             | 0,010               | -0,029              | 0,005               | 0,010            | -0,030           |
| 11                 | -0,25                            | -0,22                            | 0,15                             | -0,09                            | -0,022              | -0,021              | -0,002              | -0,019           | -0,024           |
| 12                 | -0,84                            | 0,79                             | 0,01                             | 0,02                             | -0,048              | 0,044               | 0,001               | 0,044            | -0,048           |
| 13                 | 0,10                             | -0,12                            | 0,01                             | 0,44                             | 0,005               | -0,007              | 0,012               | 0,013            | -0,015           |
| 53                 | 0,14                             | -0,71                            | 0,19                             | 0,44                             | -0,002              | -0,050              | 0,012               | 0,001            | -0,053           |
| 56                 | 0,06                             | -0,58                            | 0,18                             | 0,19                             | -0,007              | -0,043              | 0,005               | -0,006           | -0,043           |
| 58                 | -0,03                            | -0,37                            | 0,13                             | 0,25                             | -0,009              | -0,028              | 0,007               | -0,007           | -0,030           |
| 60                 | 0,12                             | -0,51                            | 0,13                             | 0,05                             | -0,001              | -0,036              | 0,001               | -0,001           | -0,036           |
| 82                 | 0,05                             | -0,40                            | 0,12                             | -0,83                            | -0,004              | -0,029              | -0,023              | 0,010            | -0,043           |

#### 4.12 lentelės tęsinys

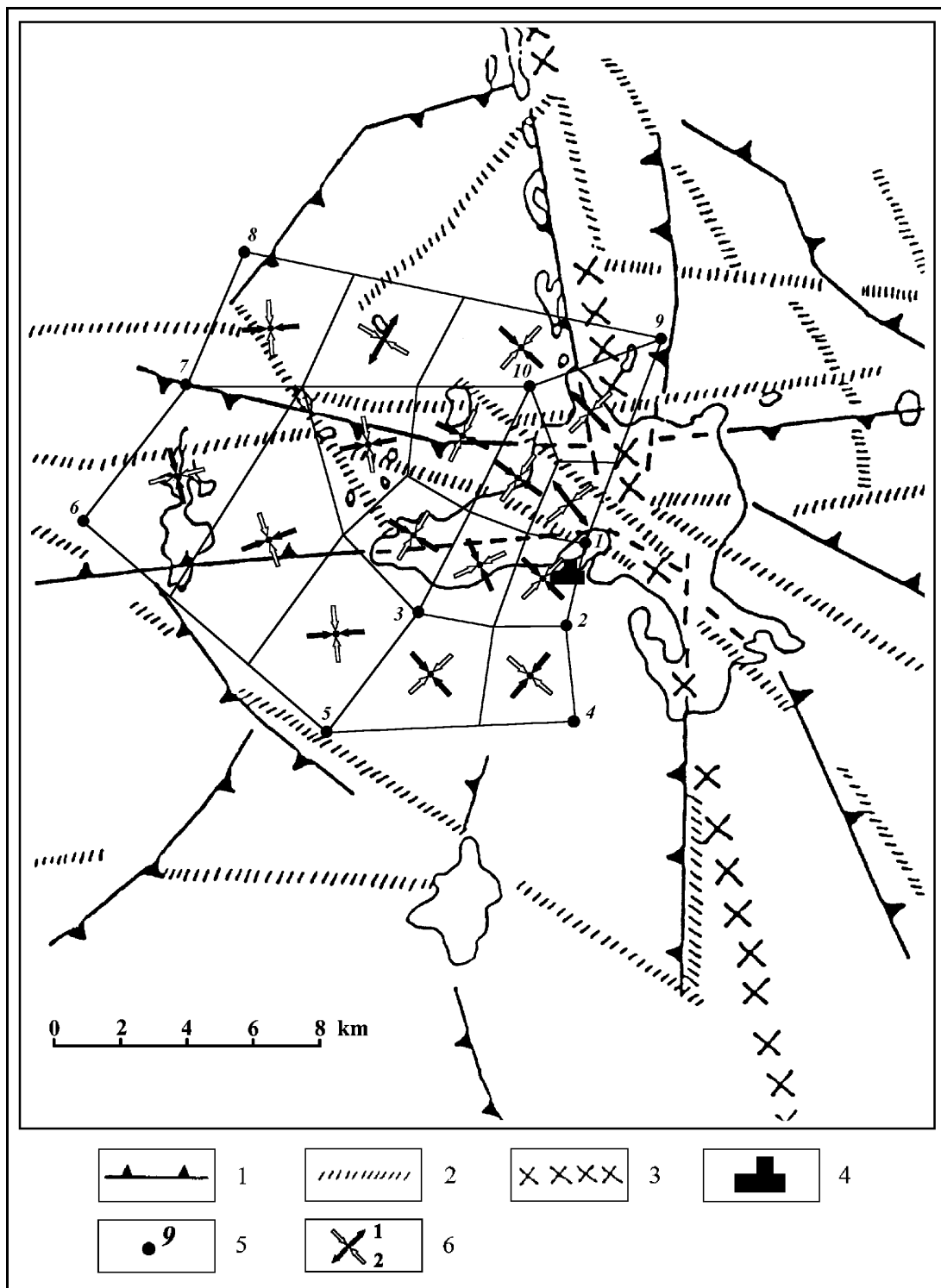
| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | $\sigma_{xx}$ , MPa | $\sigma_{yy}$ , MPa | $\sigma_{xy}$ , MPa | $\sigma_1$ , MPa | $\sigma_2$ , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 84                 | -0,02                            | -0,49                            | 0,17                             | -1,47                            | -0,011              | -0,037              | -0,041              | 0,019            | -0,067           |
| 87                 | -0,24                            | 0,34                             | -0,03                            | 1,65                             | -0,012              | 0,021               | 0,046               | 0,053            | -0,044           |
| 90                 | 0,15                             | -0,59                            | 0,14                             | 2,10                             | 0                   | -0,041              | 0,059               | 0,042            | -0,083           |
| 92                 | 0,08                             | -0,35                            | 0,09                             | 1,34                             | 0                   | -0,024              | 0,038               | 0,027            | -0,052           |
| 94                 | -0,24                            | -0,02                            | 0,09                             | 1,54                             | -0,018              | -0,006              | 0,043               | 0,031            | -0,055           |
| 132                | 0                                | -0,52                            | 0,17                             | 0,09                             | -0,010              | -0,039              | 0,002               | -0,010           | -0,039           |
| 133                | 0,53                             | -1,11                            | 0,19                             | -0,62                            | 0,019               | -0,073              | -0,017              | 0,022            | -0,076           |
| 134                | 0,07                             | -0,93                            | 0,29                             | 0,04                             | -0,012              | -0,068              | 0,001               | -0,012           | -0,068           |
| 135                | -0,33                            | -0,43                            | 0,25                             | 0,06                             | -0,032              | -0,038              | 0,002               | -0,032           | -0,039           |
| 146                | -0,06                            | -0,49                            | 0,18                             | -0,84                            | -0,013              | -0,038              | -0,024              | 0,001            | -0,052           |
| 147                | -0,05                            | -1,06                            | 0,37                             | -0,11                            | -0,024              | -0,080              | -0,003              | -0,023           | -0,081           |
| 148                | -0,98                            | 0,12                             | 0,28                             | 0,96                             | -0,071              | -0,009              | 0,027               | 0,001            | -0,081           |

Normalinių įtempių  $\sigma_{xx}$  pokyčių kitimo ribos – nuo -0,240 MPa iki 0,090 MPa,  $\sigma_{yy}$  kinta nuo -0,388 MPa iki 0,073 MPa, tangentiųjų įtempių pokyčiai – nuo -0,175 MPa iki 0,122 MPa. Maksimalių svarbiausiųjų įtempių pokyčių kitimo ribos – nuo -0,042 MPa iki 0,141 MPa, o minimalių svarbiausiųjų įtempių pokyčiai kinta nuo -0,413 MPa iki 0,011 MPa. Svarbiausiosios deformacijos yra tarpusavyje statmenos.

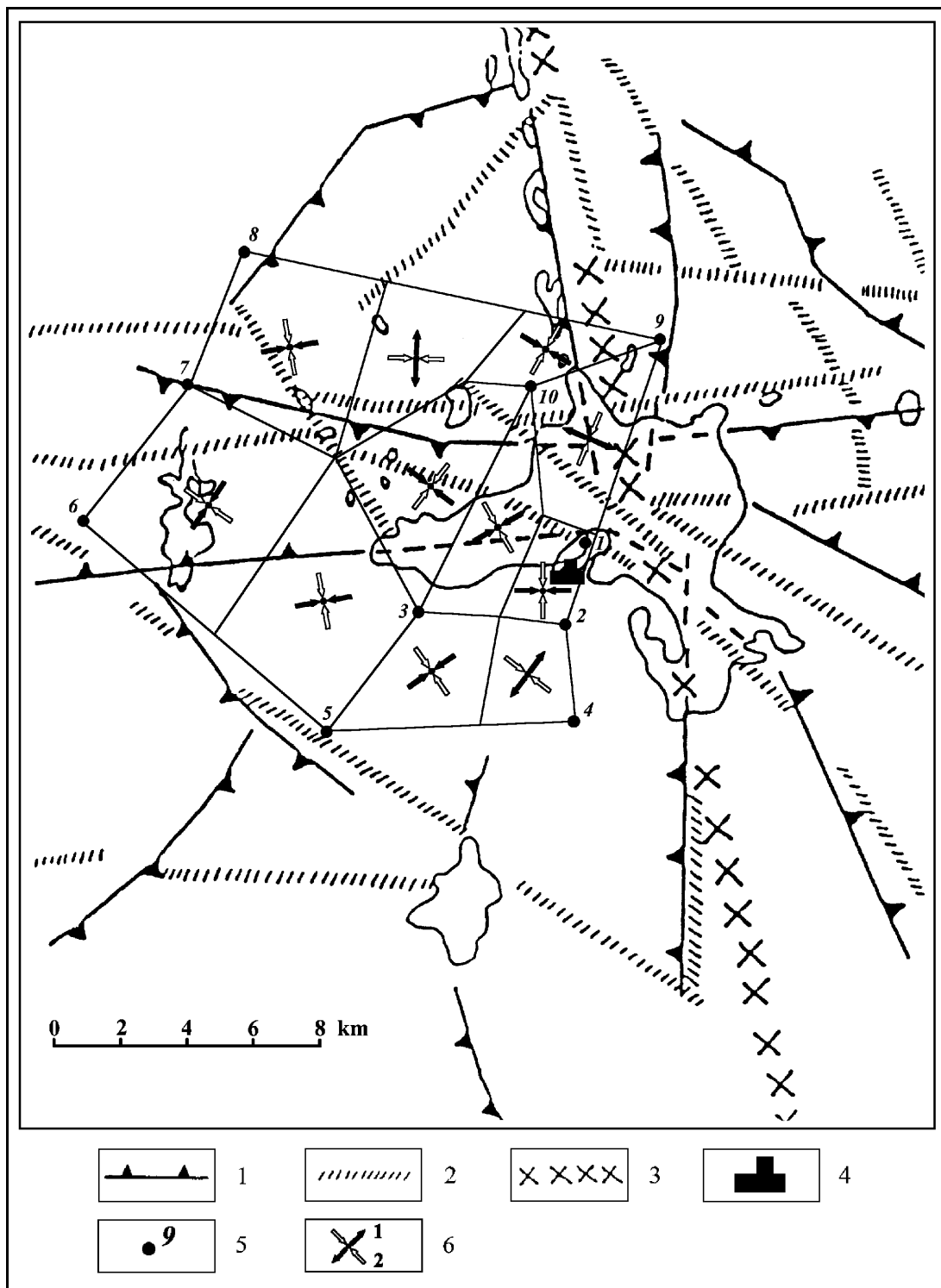
Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų, tektoninių įtempių pokyčių reikšmės bei jų kaitos tiriamajame areale savybės išlieka panašios skaičiuojant poslinkius baigtiniame elemente pagal (3.32), (3.33), (3.36) ir (3.37) formules, o taip pat teritoriją baigtiniais elementais suskaidžius kitaip, nei parodyta 4.23–4.27 pav., įtraukus kitus poligono punktus [191, 215, 218].

Remiantis modeliavimo analizės rezultatais (4.23–4.27 pav. ir 4.8–4.12 lentelės) Ignalinos atominės elektrinės rajone pastebimi tam tikri Žemės plutos svarbiausiųjų įtempių pokyčių pasiskirstymo dėsninymai. Jie yra susiję su teritorijos tektonine sandara [84, 135]. Maksimalių įtempių pokyčiai beveik lygiagretūs su kristalinio pamato lūžiais, o minimalių įtempių pokyčiai jiems statmeni.

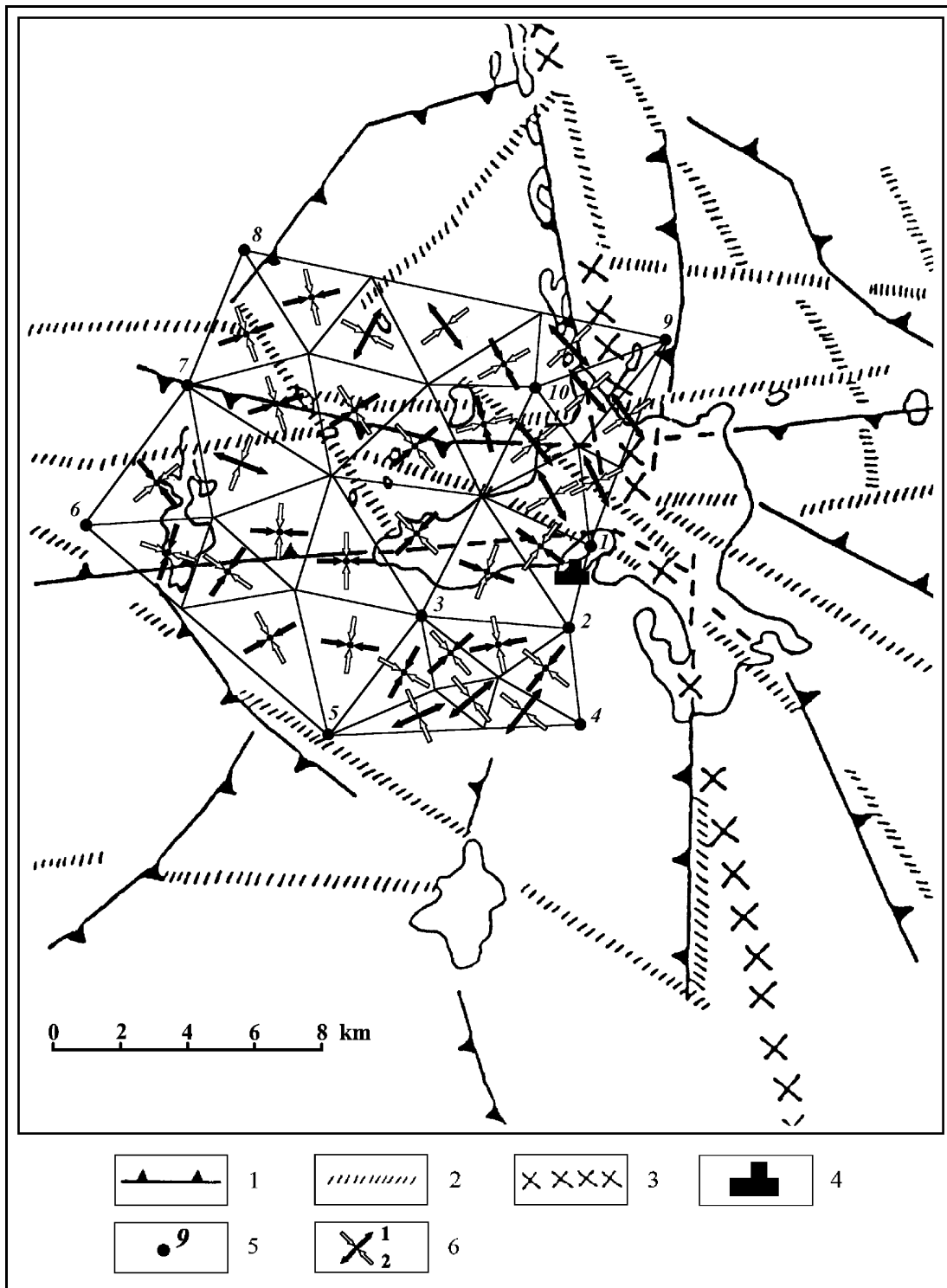
Minimalių svarbiausiųjų įtempių pokyčiai yra neigiami (išskyrus tris mazginius taškus), t. y. geodinaminiam poligone Žemės plutos spaudimo vyraujanti kryptis yra statmena pagrindiniams tektoniniams lūžiams (4.8–4.12 lentelės).



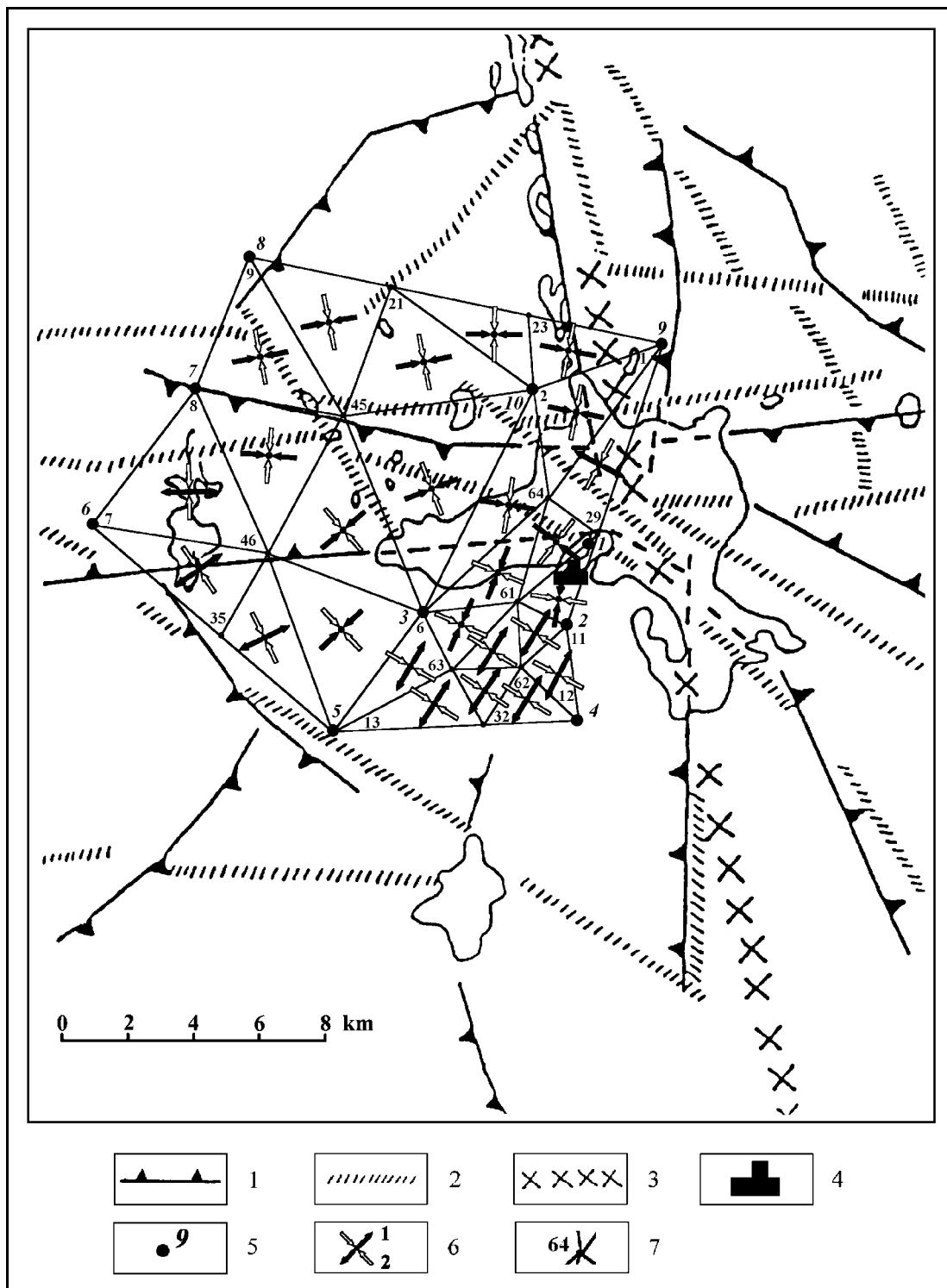
**4.23 pav.** Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtempių pokyčių kryptys (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 16 keturkampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis)



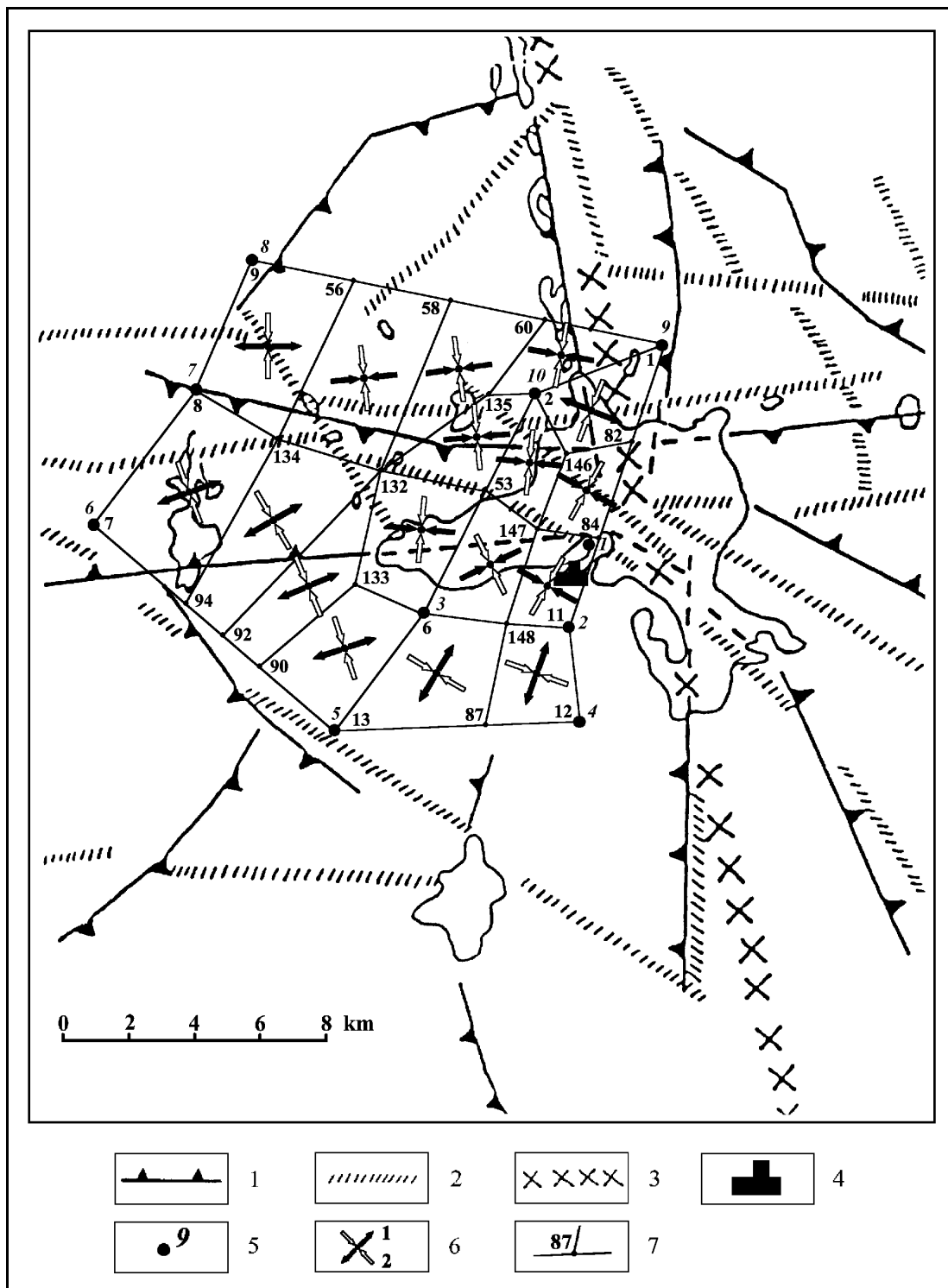
**4.24 pav.** Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtempių pokyčių kryptys (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 11 keturkampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis)



**4.25 pav.** Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtempių pokyčių kryptys (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 33 trikampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominę elektrinę, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis)



**4.26 pav.** Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtempių pokyčių kryptys (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 26 trikampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis), 7 – baigtinio elemento viršūnės mazginis taškas



**4.27 pav.** Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtempių pokyčių kryptys (baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 17 keturkampių). Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio pokytis), 7 – baigtinio elemento viršūnės mazginis taškas

Maksimalaus svarbiausiojo įtempio pokyčių kryptį orientacija yra artima pagrindinių tektoninių lūžių kryptims. Tai rodo, kad vyksta tam tikras blokų poslinkis pagal tektoninius lūžius.

Geodeziniais matavimais nustatytų svarbiausiųjų įtempių pokyčių kryptys Ignalinos atominės elektrinės rajone bendrais bruožais sutampa su [135] darbe pateiktomis geologiniais tyrimais nustatytomis didžiausiomis Žemės plutos spaudimo kryptimis rytinėje Lietuvos dalyje.

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtempių Ignalinos atominės elektrinės rajone rezultatai, gauti modeliuojant baigtinių elementų metodu, neprieštarauja [2, 188, 189, 190, 214] darbuose pateiktiems tyrimų duomenims.

Horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtempių modeliavimas baigtinių elementų metodu leidžia tiksliau bei detaliau nustatyti Žemės plutos judesių dėsninumus, atsižvelgiant į mechanines bei struktūrines tiriamojo regiono savybes.

#### **4.5. KOORDINAČIŲ SISTEMINGŲJŲ PAKLAIDŲ ĮTAKA ŽEMĖS PLUTOS DEFORMACIJŲ RODIKLIŲ ĮVERTČIAM**

Žemės plutos horizontaliosioms deformacijoms nagrinėti pagal geodezinių matavimų rezultatus pastaruoju metu plačiau taikomi tenzorinės analizės principais pagrįsti tyrimo metodai [3, 4, 5, 30, 34, 57, 98, 113, 125, 132, 151, 162, 167], invariantiški koordinacių sistemoms. Invariantiškumas koordinacių sistemų atžvilgiu čia suprantamas kaip nustatytų svarbiausiųjų deformacijų (didžiausiojo ir mažiausiojo santykinio pailgėjimo, dilatacijos) rodiklių nepriklausomumas nuo koordinacių sistemų pradžios ir orientavimo. Netgi – viena koordinacių sistemos pradžia gali būti atliekant vieną matavimų ciklą, o kita – pakartotinai matuojant geodezinį tinklą. Svarbu tik, kad abiem atvejais būtų tos pačios koordinacių ašių orientavimo kryptys, nors šias kryptis galima pasirinkti laisvai. Tai yra todėl, kad įvertinant deformacijų tenzorius elementus, lemiamos įtakos turi ne absoliučiosios taškų koordinacių vertės, o taškų koordinacių skirtumai ir jų nesutapimai per pirmąjį ir vėlesnius matavimų ciklus [167, 171, 182, 187, 220]. Čia lemiamos reikšmės neturi netgi sistemingosios matavimų paklaidos, jei per visus matavimų ciklus jos yra tos pačios, pavyzdžiui, jei per visus ciklus matavimai atliekami tuo pačiu sistemingąją matavimų paklaidą turinčiu prietaisu. Jeigu atliekant kartotinius matavimus deformacijoms nustatyti ir jų rodikliams įvertinti matavimų rezultatams įtakos turi sistemingosios paklaidos arba per visą matavimų ciklą paklaidų kaupimosi dėsnis yra kitoks, jos turės įtakos koordinatėms, koordinacių skirtumams ir tų skirtumų, apskaičiuotų per skirtingus matavimų ciklus, nesutapimams. Kadangi deformacijų

tenzoriai įvertinami pagal koordinačių skirtumus ir jų nesutapimus tarp matavimų ciklą, tokios sistemingosios matavimų paklaidos turės įtakos ir nustatytiems deformacijų parametrams. Šiuo metu sistemingųjų matavimo paklaidų įtakos Žemės plutos judesių rodiklių įverčiams klausimai ištirti nepakankamai.

Sistemingųjų koordinačių paklaidų įtaka horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliams nagrinėjama atvejo, kai deformacijos įvertinamos baigtinių elementų metodu pagal (3.1–3.9), (3.13–3.15) ir (3.18) formules [167, 175, 187, 189, 192]. Baigtiniu elementu laikomas trikampis.

Atliekant teorinę analizę ir skaičiuojamąjį eksperimentą tariama, kad per pradinį matavimų ciklą baigtinių elementų (trikampių) viršūnių koordinatės neturi sistemingųjų paklaidų. Per kitus matavimų ciklus nustatytoms taškų koordinatėms įtakos turi pagal tam tikrus dėsnius pasireiškiančios sistemingosios paklaidos. Išnagrinėti įvairūs sistemingųjų paklaidų tiesinio kaupimosi atvejai.

### ***Taškų koordinačių paklaidos pastovios (I variantas)***

Tuomet per antrąjį matavimų ciklą nustatytų koordinačių vertės bus [187]:

$$x_i'' = x_i' + \delta_x, \quad (4.6)$$

$$y_i'' = y_i' + \delta_y, \quad (4.7)$$

čia  $i = 1, 2, 3$  – trikampio viršūnių numeriai,  $x_i'', y_i''$  – per antrąjį ciklą išmatuotų koordinačių vertės, kurioms įtakos turėjo sistemingosios paklaidos,  $x_i', y_i'$  – koordinačių vertės be sistemingųjų paklaidų,  $\delta_x, \delta_y$  – pastoviosios sistemingosios antrojo matavimo ciklo koordinačių paklaidos.

Deformacijų rodiklių (3.13–3.15) ir (3.18) verčių paklaidos priklausys nuo to, kokios įtakos sistemingosios koordinačių paklaidos  $\delta_x, \delta_y$  turės determinantų (3.6–3.9) įverčiams. Determinantas (3.5) skaičiuojamas pagal pirmojo matavimų ciklo rezultatus, todėl antrojo matavimų ciklo sistemingosios paklaidos determinanto įverčiui reikšmės neturės.

Dėl sistemingųjų paklaidų įtakos determinanto  $D_{11}$  (3.6) vertė bus [187]:

$$D'_{11} = \begin{vmatrix} 1 & x'_1 + \delta_x - x_1 & y_1 \\ 1 & x'_2 + \delta_x - x_2 & y_2 \\ 1 & x'_3 + \delta_x - x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \delta_x & y_1 \\ 1 & \delta_x & y_2 \\ 1 & \delta_x & y_3 \end{vmatrix}. \quad (4.8)$$

Iš (4.8) formulės matyti, kad antrojo determinanto pirmasis ir antrasis stulpeliai proporcingi, todėl determinanto reikšmė lygi nuliui [74, 126, 175, 187] ir determinanto  $D'_{11}$  įvertis nepriklauso nuo paklaidų  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ , t. y.:

$$D'_{11} = D_{11}. \quad (4.9)$$

Analogiškai gaunama:

$$D'_{12} = D_{12}, \quad (4.10)$$

$$D'_{22} = D_{22}, \quad (4.11)$$

$$D'_{21} = D_{21}. \quad (4.12)$$

Remiantis (4.9–4.12) lygybėmis galima daryti išvadą, kad antrojo matavimų ciklo pastoviosios sistemingosios matavimų paklaidos deformacijos tenzorius elementams (3.4) ir deformacijų rodiklių įverčiams (3.13–3.15) ir (3.18) įtakos neturi.

### ***Taškų koordinačių paklaidos priklauso nuo koordinačių verčių (II variantas)***

Šiuo atveju per antrąjį matavimų ciklą nustatytos taškų koordinačių vertės bus [187]:

$$x''_i = x'_i + \mu_x \cdot x_i, \quad (4.13)$$

$$y''_i = y'_i + \mu_y \cdot y_i, \quad (4.14)$$

čia  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  – tiesinę sistemingųjų matavimo paklaidų priklausomybę nuo koordinačių verčių apibūdinantys koeficientai.

Išnagrinėsime koordinačių (4.13), (4.14), kurioms įtakos turėjo paklaidos, reikšmę (3.6–3.9) determinantų įverčiams [187]:

$$D'_{11} = \begin{vmatrix} 1 & x'_1 + \mu_x \cdot x_1 - x_1 & y_1 \\ 1 & x'_2 + \mu_x \cdot x_2 - x_2 & y_2 \\ 1 & x'_3 + \mu_x \cdot x_3 - x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \mu_x \cdot x_1 & y_1 \\ 1 & \mu_x \cdot x_2 & y_2 \\ 1 & \mu_x \cdot x_3 & y_3 \end{vmatrix} = D_{11} + \mu_x \cdot D. \quad (4.15)$$

Analogiškai gaunama:

$$D'_{22} = D_{22} + \mu_y \cdot D. \quad (4.16)$$

Tokiu pačiu būdu kaip ir (4.15) lygybėje į (3.7) įrašius reikšmes iš (4.13), (4.14) ir išskaidžius determinantą į du dėmenis, gaunama [187]:

$$D'_{12} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \Delta x_1 \\ 1 & x_2 & \Delta x_2 \\ 1 & x_3 & \Delta x_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \mu_x \cdot x_1 \\ 1 & x_2 & \mu_x \cdot x_2 \\ 1 & x_3 & \mu_x \cdot x_3 \end{vmatrix} = D_{12}. \quad (4.17)$$

Kadangi antrojo determinanto antrasis ir trečiasis stulpelis proporcingi, analogiškai gaunama:

$$D'_{21} = D_{21}. \quad (4.18)$$

Atsižvelgiant į (4.15–4.18) ir (3.4), deformacijų tenzoriaus (3.1) elementai bus [187]:

$$e'_{11} = e_{11} + \mu_x, \quad (4.19)$$

$$e'_{12} = e_{12}, \quad (4.20)$$

$$e'_{22} = e_{22} + \mu_y, \quad (4.21)$$

$$e'_{21} = e_{21}. \quad (4.22)$$

Turint deformacijų tenzorius elementus (4.19–4.22), apskaičiuojami deformacijų rodiklių įverčiai [187]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left[ (e_{11} + e_{22}) + (\mu_x + \mu_y) + \sqrt{(e_{11} - e_{22}) + (\mu_x - \mu_y)^2 + (e_{12} + e_{21})^2} \right], \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left[ (e_{11} + e_{22}) + (\mu_x + \mu_y) - \sqrt{(e_{11} - e_{22}) + (\mu_x - \mu_y)^2 + (e_{12} + e_{21})^2} \right], \quad (4.24)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left( -\frac{e_{12} + e_{21}}{(e_{11} - e_{22}) + (\mu_x - \mu_y)} \right) + \begin{cases} 90^\circ, \text{ kai } (e_{11} - e_{22}) > 0 \\ 0^\circ, \text{ kai } (e_{11} - e_{22}) < 0 \end{cases}, \quad (4.25)$$

$$\Delta = (e_{11} + e_{22}) + (\mu_x + \mu_y), \quad (4.26)$$

$$\omega'' = \frac{\rho''}{2} (e_{12} - e_{21}). \quad (4.27)$$

***Taškų koordinačių paklaidos yra pastoviųjų paklaidų ir koordinačių vertėms proporcingų paklaidų suma (III variantas)***

Tuomet dėl paklaidų įtakos antrojo matavimų ciklo koordinatės bus [187]:

$$x_i'' = x_i' + \delta_x + \mu_x \cdot x_i, \quad (4.28)$$

$$y_i'' = y_i' + \delta_y + \mu_y \cdot y_i. \quad (4.29)$$

Atsižvelgiant į (4.28), (4.29) įvertinamos determinantų (3.6–3.9) koordinačių vertės [187]:

$$D'_{11} = \begin{vmatrix} 1 & x_1' + \delta_x + \mu_x \cdot x_1 - x_1 & y_1 \\ 1 & x_2' + \delta_x + \mu_x \cdot x_2 - x_2 & y_2 \\ 1 & x_3' + \delta_x + \mu_x \cdot x_3 - x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \quad (4.30)$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \delta_x & y_1 \\ 1 & \delta_x & y_2 \\ 1 & \delta_x & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \mu_x \cdot x_1 & y_1 \\ 1 & \mu_x \cdot x_2 & y_2 \\ 1 & \mu_x \cdot x_3 & y_3 \end{vmatrix},$$

arba

$$D'_{11} = D_{11} + \mu_x \cdot D. \quad (4.31)$$

Analogiškai gaunama:

$$D'_{12} = D_{12}, \quad (4.32)$$

$$D'_{22} = D_{22} + \mu_y \cdot D, \quad (4.33)$$

$$D'_{21} = D_{21}. \quad (4.34)$$

Iš (4.31–4.34) matyti, kad esant (4.28) ir (4.29) sistemingsioms paklaidoms, determinantų (3.6–3.9) įverčiai yra tokie patys kaip ir anksčiau nagrinėtu atveju, kai sistemingosios paklaidos turi įtakos koordinatėms pagal (4.13) ir (4.14) priklausomybes. Todėl ir deformacijų rodikliams įtaka bus tokia pati.

***Sistemosios koordinačių paklaidos yra pastoviųjų ir abiejų koordinačių vertėms tiesiškai proporcingų paklaidų suma (IV variantas)***

Paklaidų įtaka antrojo matavimų ciklo metu nustatytoms koordinatėms bus [187]:

$$x''_i = x'_i + \delta_x + \mu_1 \cdot x_i + \mu_2 \cdot y_i, \quad (4.35)$$

$$y''_i = y'_i + \delta_y + \mu_3 \cdot x_i + \mu_4 \cdot y_i. \quad (4.36)$$

Apskaičiuojami (3.6–3.9) determinantai, atsižvelgiant į (4.35), (4.36) priklausomybes [187]:

$$D'_{11} = \begin{vmatrix} 1 & x'_1 + \delta_x + \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot y_1 & y_1 \\ 1 & x'_2 + \delta_x + \mu_1 \cdot x_2 + \mu_2 \cdot y_2 & y_2 \\ 1 & x'_3 + \delta_x + \mu_1 \cdot x_3 + \mu_2 \cdot y_3 & y_3 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & \Delta x_1 & y_1 \\ 1 & \Delta x_2 & y_2 \\ 1 & \Delta x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \delta_x & y_1 \\ 1 & \delta_x & y_2 \\ 1 & \delta_x & y_3 \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} 1 & \mu_1 \cdot x_1 & y_1 \\ 1 & \mu_1 \cdot x_2 & y_2 \\ 1 & \mu_1 \cdot x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & \mu_2 \cdot y_1 & y_1 \\ 1 & \mu_2 \cdot y_2 & y_2 \\ 1 & \mu_2 \cdot y_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (4.37)$$

arba

$$D'_{11} = D_{11} + \mu_1 \cdot D. \quad (4.38)$$

Analogiškai gaunama:

$$D'_{12} = D_{12} + \mu_2 \cdot D, \quad (4.39)$$

$$D'_{22} = D_{22} + \mu_4 \cdot D, \quad (4.40)$$

$$D'_{21} = D_{21} + \mu_3 \cdot D. \quad (4.41)$$

Atsižvelgiant į (4.38–4.41), deformacijų tenzoriaus (3.1) elementų vertės yra [187]:

$$e'_{11} = e_{11} + \mu_1, \quad (4.42)$$

$$e'_{12} = e_{12} + \mu_2, \quad (4.43)$$

$$e'_{22} = e_{22} + \mu_4, \quad (4.44)$$

$$e'_{21} = e_{21} + \mu_3. \quad (4.45)$$

Deformacijų rodikliai (3.13–3.15) ir (3.18) šiuo atveju [187]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \cdot [(e_{11} + e_{22}) + (\mu_1 + \mu_4) + \sqrt{[(e_{11} - e_{22}) + (\mu_1 - \mu_4)]^2 + [(e_{12} - e_{21}) + (\mu_2 - \mu_3)]^2}] , \quad (4.46)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \cdot [(e_{11} + e_{22}) + (\mu_1 + \mu_4) - \sqrt{[(e_{11} - e_{22}) + (\mu_1 - \mu_4)]^2 + [(e_{12} - e_{21}) + (\mu_2 - \mu_3)]^2}] , \quad (4.47)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \left( - \frac{(e_{12} + e_{21}) + (\mu_2 + \mu_3)}{(e_{11} - e_{22}) + (\mu_1 - \mu_4)} \right) + \begin{cases} 90^\circ, & \text{kai } (e_{11} - e_{22}) > 0 \\ 0^\circ, & \text{kai } (e_{11} - e_{22}) < 0 \end{cases} , \quad (4.48)$$

$$\Delta = (e_{11} + e_{22}) + (\mu_1 + \mu_4) , \quad (4.49)$$

$$\omega'' = \frac{\rho''}{2} \cdot [(e_{12} - e_{21}) + (\mu_2 - \mu_3)] . \quad (4.50)$$

***Sistemosios koordinačių paklaidos, atsiradusios dėl geodezinio tinklo koordinačių pradžios poslinkio, orientavimo ir mastelio pokyčio (V variantas)***

Esant nedideliam orientavimo pokyčiui sistemosios punktų koordinačių paklaidos bus lygios koordinačių pataisoms, gaunamoms perskaičiuojant koordinates iš vienos sistemos į kitą [167], t. y.:

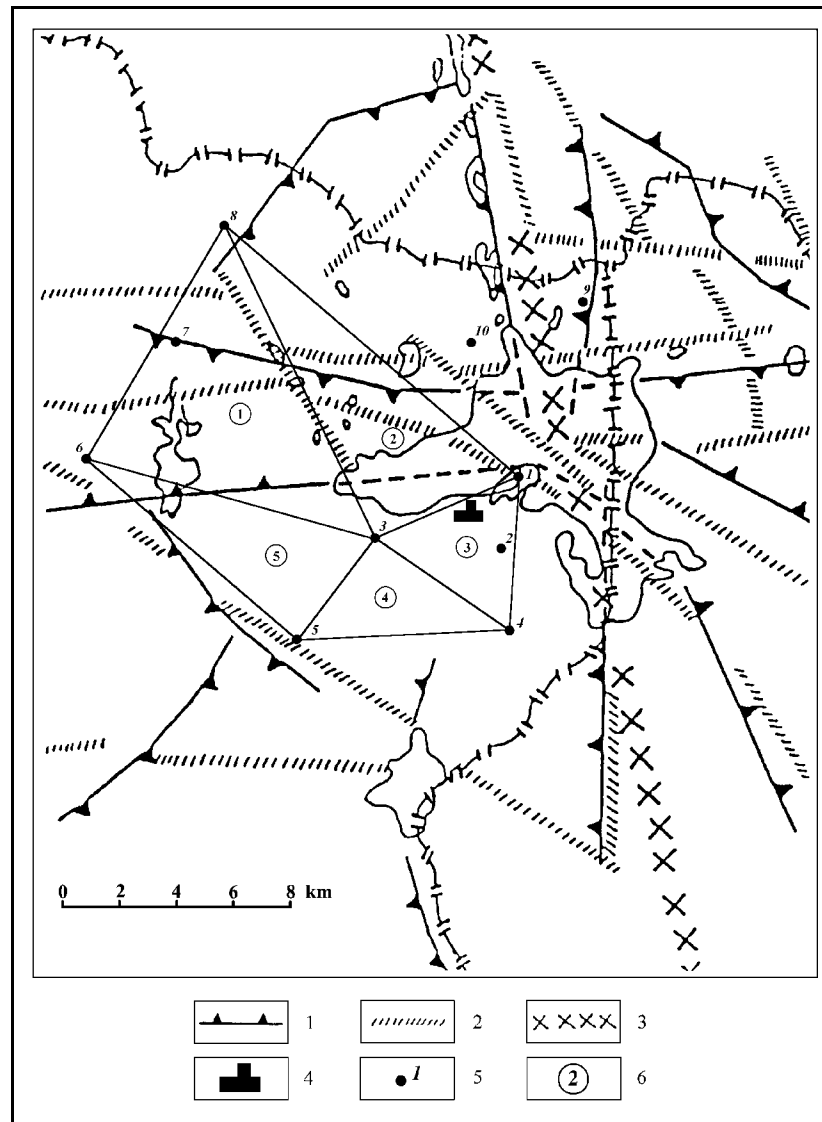
$$x_i'' = x_i' + a_o - \kappa \cdot y_i + m \cdot x_i , \quad (4.51)$$

$$y_i'' = y_i' + b_o + \kappa \cdot x_i + m \cdot y_i , \quad (4.52)$$

čia  $a_o$ ,  $b_o$  – koordinačių pradžios poslinkis,  $\kappa$  – orientavimo pokyčio reikšmė radianais,  $m$  – mastelio pokytis.

Palyginus (4.51) ir (4.52) lygtis su (4.35) ir (4.36), matomas jų panašumas. Pažymėjus (4.51), (4.52) lygtyse  $a_o = \delta_x$ ,  $b_o = \delta_y$ ,  $-\kappa = \mu_1$ ,  $m = \mu_2 = \mu_4$ ,  $\kappa = \mu_3$ , jos būtų tapačios (4.35) ir (4.36) lygtims. Todėl šiuo atveju sistemingųjų koordinatinių paklaidų įtaka Žemės plutos deformacijų tenzorių ir deformacijų rodiklių įverčiams tokia pati, kaip nagrinėtame 4 variante.

Atliktas šešis punktus turinčio geodezinio tinklo skaičiuojamasis eksperimentas (4.28 pav.). Teritorija suskaidyta į penkis trikampius.



**4.28 pav.** Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baigtinių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje. Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominę elektrinę, 5 – GPS punktas, 6 – baigtinio elemento numeris

Pagal pirmojo ir antrojo matavimų ciklą rezultatus nustatytosios punktų koordinatės, kurioms neturėjo įtakos sistemingosios paklaidos, pateiktos 2.4 lentelėje.

Skaičiavimai atlikti trimis variantais:

- kai nėra sistemingųjų paklaidų (pagal 2.4 lentelėje pateiktas koordinačių vertes);
- kai koordinačių paklaidos pastoviosios, t. y. kai antrojo matavimų ciklo koordinatės modeliuojamos pagal (4.6) ir (4.7) lygtis;
- kai koordinačių sistemingosios paklaidos modeliuojamos pagal (4.13) ir (4.14) lygtis.

Modeliuojant tariama:  $\delta_x = 0,040 \text{ m}$ ,  $\delta_y = -0,025 \text{ m}$ ,  $\mu_x = \mu_y = -1 \cdot 10^{-6}$ .

Visų trijų modeliavimo variantų apskaičiuotosios deformacijų tenzoriaus (3.1) reikšmės pateiktos 4.13 lentelėje, o svarbiausių deformacijų rodiklių – didžiausiojo santykinio pailgėjimo  $\varepsilon_1$  ir mažiausiojo santykinio pailgėjimo  $\varepsilon_2$  (3.13), dilatacijos  $\Delta$  (3.15) reikšmės 4.14 lentelėje.

Iš 4.13 ir 4.14 lentelėse pateiktų duomenų matyti, kad modeliavimo rezultatai atitinka teorinių tyrimų duomenis.

Apibendrinus atliktus Žemės plutos deformacijų tenzorių ir svarbiausių deformacijų rodiklių įvertinimo pagal geodezinių matavimų duomenis baigtinių elementų metodu teorinių tyrimų bei skaičiuojamojo eksperimento rezultatus matyti, kad:

- Žemės plutos deformacijų tenzoriams ir svarbiausių deformacijų rodiklių įverčiams pastoviosios geodezinių punktų koordinačių paklaidos įtakos neturi;
- Žemės plutos deformacijų tenzoriaus komponentės ir deformacijų rodikliai dėl bet kokių tiesiškai nuo geodezinių punktų padėties priklausančių sistemingųjų koordinačių paklaidų keičiasi pastoviai reikšme ir tas pokytis nuo koordinačių verčių nepriklauso;
- nustačius tiesiškai nuo geodezinių punktų padėties koordinačių priklausomų sistemingųjų paklaidų dėsnį, galima įvertinti paklaidų įtaką Žemės plutos deformacijų rodikliams ir šią įtaką eliminuoti.

**4.13 lentelė.** Deformacijų tenzoriaus elementai

| Trikampio Nr. | Modeliavimo variantai  |       |       |                        |       |       |                        |       |       |                        |       |       |
|---------------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
|               | 1                      | 2     | 3     | 1                      | 2     | 3     | 1                      | 2     | 3     | 1                      | 2     | 3     |
|               | $e_{11} \cdot 10^{-6}$ |       |       | $e_{12} \cdot 10^{-6}$ |       |       | $e_{21} \cdot 10^{-6}$ |       |       | $e_{22} \cdot 10^{-6}$ |       |       |
| 1             | -1,14                  | -1,14 | -2,14 | 1,09                   | 1,09  | 1,09  | -1,12                  | -1,12 | -1,12 | -0,20                  | -0,20 | -1,20 |
| 2             | -2,03                  | -2,03 | -3,03 | -0,75                  | -0,75 | -0,75 | -1,57                  | -1,57 | -1,57 | -1,14                  | -1,14 | -2,14 |
| 3             | -1,84                  | -1,84 | -2,84 | -0,83                  | -0,83 | -0,83 | 0,11                   | 0,11  | 0,11  | -1,84                  | -1,84 | -2,84 |
| 4             | -1,14                  | -1,14 | -2,14 | -0,35                  | -0,35 | -0,35 | 1,90                   | 1,90  | 1,90  | -0,62                  | -0,62 | -1,62 |
| 5             | -2,07                  | -2,07 | -3,07 | -0,84                  | -0,84 | -0,84 | 1,11                   | 1,11  | 1,11  | 0,40                   | 0,40  | -0,60 |

**4.14 lentelė.** Svarbiausiosios santykinės deformacijos

| Trikampio Nr. | Modeliavimo variantai         |       |       |                               |       |       |                        |       |       |
|---------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
|               | 1                             | 2     | 3     | 1                             | 2     | 3     | 1                      | 2     | 3     |
|               | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-6}$ |       |       | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-6}$ |       |       | $\Delta \cdot 10^{-6}$ |       |       |
| 1             | -0,20                         | -0,20 | -1,20 | -1,14                         | -1,14 | -2,14 | -1,34                  | -1,34 | -3,34 |
| 2             | -0,34                         | -0,34 | -1,34 | -2,83                         | -2,83 | -3,83 | -3,17                  | -3,17 | -5,17 |
| 3             | -1,48                         | -1,48 | -2,48 | -2,20                         | -2,20 | -3,20 | -3,68                  | -3,68 | -5,68 |
| 4             | -0,07                         | -0,07 | -1,07 | -1,70                         | -1,70 | -2,70 | -1,76                  | -1,76 | -3,76 |
| 5             | 0,74                          | 0,74  | -0,26 | -2,41                         | -2,41 | -3,41 | -1,67                  | -1,67 | -3,67 |

#### 4.6. IŠVADOS

1. Išreiškus įtempius deformacijomis, pagal atvirkštinį Huko dėsnį gauti detalūs horizontaliųjų deformacijų parametrai bei apskaičiuoti nauji tektoninių įtempių pokyčių duomenys, nustatytos svarbiausiųjų įtempių pokyčių kryptys.

2. Taikant ANSYS programą Žemės plutos deformacijoms bei įtempiams modeliuoti baigtinių elementų metodu įvertinamas izotropinio kūno mechaninis deformacijų modelis. Taip sudaryti horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei tektoninių įtempių modeliai geriau atitinka tikrąjį Žemės plutoje vykstantį fizinį procesą negu modeliai, sudaryti remiantis tiesiniu geometrinio interpoliavimu.

3. Baigtinių elementų metodu, taikant ANSYS programą, sudaryti horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje modeliai rodo, kad analizuojamoje teritorijoje yra akivaizdi įtempių kaita ir ji susijusi su Žemės plutos sandara. Svarbiausiųjų maksimalių įtempių pokyčių kryptingumas yra artimas pagrindinių Žemės plutos lūžių šioje teritorijoje kryptims, o minimalių įtempių pokyčių kryptingumas – statmenas tektoniniams lūžiams. Kadangi minimalių įtempių pokyčiai yra neigiamo ženklo (išskyrus tris mazginius taškus), galima teigti, kad vyraujanti Žemės plutos geotektoninio spaudimo šiame rajone kryptis yra statmena Drūkšių ežerą kertančiai lūžių zonai, kuri tęsiasi iš vakarų į rytus ir rytinėje Drūkšių ežero dalyje daro posūkį į pietryčius.

4. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei tektoninių įtempių modeliavimas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje pagal geodezinių matavimų duomenis, taikant baigtinių elementų metodą, detalizuoja tiriamosios teritorijos dabartinio tektoninio aktyvumo struktūrą ir palengvina geotektoninį matavimo rezultatų interpretavimą.

5. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad ANSYS programos taikymas Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtempių pokyčiams analizuoti – gera galimybė tyrinėtojiui gauti naujų duomenų apie geodinaminių procesų raidą.

6. Nustatyta, kad dėl sistemingųjų geodezinių punktų koordinacių paklaidų Žemės plutos deformacijų rodiklių įverčiai gaunami pasislinkę, tačiau jų kaita tiriant nagrinėjamą teritoriją yra tokia pati, kaip ir nesant sistemingųjų paklaidų.

7. Remiantis horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo rezultatų analize nustatyta, kad tektoniniai Žemės plutos lūžiai Lietuvos teritorijoje yra aktyvūs, ir dabartinis teritorijos tektoninis aktyvumas yra anksčiau vykusių tektoninių procesų tęsinys.

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Horizontaliesiems Žemės plutos judesiams tirti pagal geodezinių matavimų duomenis rekomenduojama taikyti tenzorinės analizės metodiką, nes ji yra invariantiška koordinačių sistemoms ir deformacijų rodiklių įverčių reikšmės nepriklauso nuo pradinių taškų skaičiuojant koordinačių pokyčius parinkimo. Paprasčiau galima panaudoti skirtingose geodezinių koordinačių sistemose sudarytų geodezinių tinklų matavimų rezultatus.

2. Taikant baigtinių elementų metodą Žemės plutos deformacijų tenzoriams įvertinti, galima nesudėtingai ir lanksčiai panaudoti geodezinių tinklų pakartotų matavimų rezultatus bei tyrimams pritaikyti universaliasias mechaninio struktūrinio modeliavimo programas.

3. Sudaryta ir teoriškai pagrįsta apibendrintųjų horizontaliųjų Žemės plutos judesių charakteristikų pagal geodezinius matavimus įvertinimo metodika. Taikant šią metodiką, galima sudaryti apibendrintųjų Žemės plutos deformacijų sklaidą apibūdinančius struktūrinius modelius ir statistiniais kriterijais įvertinti jų adekvatiškumą matavimams.

4. Sudarytas algoritmas horizontaliųjų Žemės plutos judesių deformacijų tenzoriams ir deformacijų charakteristikoms įvertinti taikant afiniojo koordinačių perskaičiavimo ryšio formulę koeficientus. Tai leidžia panaudoti geodezinėje praktikoje plačiai taikomas kompiuterines koordinačių transformavimo programas Žemės plutos deformacijų rodikliams įvertinti.

5. Sudaryta bei teoriškai pagrįsta horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų tenzoriams komponentų skaičiavimo metodika pagal geodezinius matavimus naudojant trikampių kraštinių ilgių pokyčius. Taikant šią metodiką, deformacijų rodiklius galima įvertinti pagal išmatuotus stygų ilgius išvengiant tinklo išlyginimo įtakos ir koordinačių skaičiavimo paklaidų.

6. Sudaryta tektoninių įtempių pokyčių skaičiavimo metodika pagal geodezinių matavimų duomenis. Sąsajoms tarp horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtempių pokyčių aprašyti pritaikytas Huko dėsnis.

7. Išnagrinėtos Žemės plutos horizontaliesiems judesiams tirti ANSYS programos galimybės bei taikymo ypatumai. Taikant šią programą, galima sudaryti žymiai detalesnius Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtempių pokyčių modelius, lyginant su kitais geodezinių tyrimų būdais.

8. Išnagrinėta sistemingųjų koordinačių paklaidų įtaka Žemės plutos deformacijų tenzoriams ir svarbiausiems deformacijų rodikliams, kai deformacijų rodikliai pagal geodezinius matavimus apskaičiuojami baigtinių elementų metodu. Nustatyta, kad pastovios koordinačių paklaidos deformacijų tenzoriams ir deformacijų rodikliams įtakos neturi. Dėl

kitų tiesiškai nuo koordinačių reikšmių priklausančių sistemingųjų paklaidų gaunami pasislinkę rodiklių įverčiai, tačiau jų sklaidos dėsningumai išlieka tie patys, kaip ir nesant sistemingųjų paklaidų. Sudarytos formulės sistemingųjų paklaidų įtakai eliminuoti.

9. Atlikus horizontaliųjų Žemės plutos judesių fono tyrimus Lietuvos teritorijoje su 95% tikimybe nustatyta, kad apibendrintasis modelis yra blokinės struktūros. Žemės plutos deformacijų modelio sąsajos su tektoninės sandaros ypatumais rodo šiuolaikinę teritorijos tektoninę aktyvumą.

10. Nustatyta, kad Ignalinos atominės elektrinės rajone didžiausių santykinų pailgėjimų kryptys ir jų pokyčiai koreliuojasi su tektoninių lūžių kryptimis. Metinės didžiausiojo santykinio pailgėjimo reikšmės kinta nuo  $-0,99 \cdot 10^{-6}$  iki  $0,28 \cdot 10^{-6}$ , einant iš pietvakarių į šiaurės rytus spaudimo zona pereina į tempimo zoną.

11. Mažiausiojo metinio santykinio pailgėjimo kryptimis deformacijos yra neigiamos (nuo  $-0,51 \cdot 10^{-6}$  iki  $-2,43 \cdot 10^{-6}$ ) ir jų intensyvumas didesnis negu didžiausiojo pailgėjimo kryptimis. Todėl santykinė teritorijos dilatacija visame nagrinėjamame Ignalinos atominės elektrinės rajone yra neigiama, ir teritorija yra bendrojo tektoninio spaudimo zonoje.

12. Taikant siūlomą tektoninių įtempių įvertinimo metodiką gauti nauji horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone duomenys – tektoninių įtempių pokyčiai. Metiniai maksimaliųjų tektoninių įtempių pokyčiai kinta nuo  $-0,042$  MPa iki  $0,141$  MPa, o minimaliųjų įtempių pokyčiai kinta nuo  $-0,413$  MPa iki  $0,011$  MPa.

13. Nustatyta, kad Ignalinos atominės elektrinės rajonas šiuo metu yra tektoniškai aktyvus. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtempių pokyčių sklaida susijusi su Žemės plutos lūžiais bei tektoninėmis struktūromis. Horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo rezultatai patvirtina anksčiau atliktų vertikaliųjų judesių tyrimų šioje teritorijoje išvadas apie dabartinę tektoninių lūžių aktyvumą ir teikia papildomą informaciją, reikalingą atominės elektrinės aplinkos ekogeodinaminei rizikai vertinti.

14. Žemės plutos deformacijų sistemingąjį tyrimą Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone reikalinga tęsti ir integruoti į elektrinės seisminio monitoringo programą.

15. Lietuvos teritorijoje gauti horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų duomenys gali būti panaudoti įgyvendinant Pasaulinio tektoninių įtempių lauko žemėlapių sudarymo projektą.

## LITERATŪRA

1. Abolghasem, A. M.; Grafarend, E. W. Finite element analysis of quasi-static earthquake displacement fields observed by GPS. *Journal of Geodesy*, Vol 77, No 9. Springer-Verlag GmbH, 2003, p. 529–536.
2. Aksamitauskas, Č.; Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Geodetic measurements for the estimation of eco-geodynamic risks in the area of the Ignalina nuclear power plant. In: 33<sup>e</sup> Symposium International FESF Strasbourg, Recent Developments in Environmental Protection, Vol 40. Bern, Berlin, Bruxelles, Frankfurt am Main, New York, Oxford, Wien: Peter Lang AG, European Academic Publishers, 2005, p. 237–251.
3. Aksamitauskas, Č.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Modelling of deformations and stresses of the Earth-crust in the zones of ecologically dangerous objects. In: International Symposium on Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, Programme and Abstracts. University of Jaén, Valencia, Spain, 2005, p. 81–82.
4. Altiner, Y. The contribution of GPS data to the detection of the Earth's crust deformations illustrated by GPS campaigns in the Adria region. *Geophysical Journal International*, Vol 145, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 550–559.
5. Amore, M.; Bonaccorso, A.; Ferrari, F.; Matia, M. Eolo: software for the automatic on-line treatment and analysis of GPS data for environmental monitoring. *Computers & Geosciences*, Vol 28, No 2. Pergamon-Elsevier Science Ltd., 2002, p. 271–280.
6. Angevine, Ch. L.; Heller, P. L.; Paola, Ch. Quantitative sedimentary basin modelling. A.A.P.G. continuing education course note, Series 32, Tulsa, 1990. 133 p.
7. ANSYS Theory Reference. Tenth Edition. SAS IP, Inc., 1998.
8. Anzidei, M.; Baldi, P.; Casula, G.; Galvani, A.; Mantovani, E.; Pesci, A.; Riguzzi, F.; Serpelloni, E. Insights into present-day crustal motion in the central Mediterranean area from GPS surveys. *Geophysical Journal International*, Vol 146, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 98–110.
9. Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. Tamprumo teorijos pagrindai. Vilnius: Technika, 2004. 516 p.
10. Augath, W. Crustal deformation. National report of the federal republic of Germany on the geodetic activities in the years 1999–2003, Heft Nr. 312. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, 2003, p. 123–127.

11. Azzaro, R.; Mattia, M.; Puglisi, G. Fault creep and kinematics of the eastern segment of the Pernicana Fault (Mt. Etna, Italy) derived from geodetic observations and their tectonic significance. *Tectonophysics*, Vol 333, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2001, p. 401–415.
12. Bada, G.; Cloetingh, S.; Gerner, P.; Horváth, F. Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. *Geophysical Journal International*, Vol 134, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 1998, p. 87–101.
13. Bada, G.; Horváth, F.; Gerner, P.; Fejes, I. Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. *Journal of Geodynamics*, Vol 27, Numbers 4–5. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 1999, p. 501–527.
14. Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vilnius: Technika, 2004. 612 p.
15. Barberi, G.; Cocina, O.; Neri, G.; Privitera, E.; Spampinato, S. Volcanological inferences from seismic-strain tensor computations at Mt. Etna Volcano, Sicily. *Bulletin of Volcanology*, Vol 62, Numbers 4–5. Springer–Verlag GmbH, 2000, p. 318–330.
16. Belevičius, R. Computer algebra in finite element method. Vilnius: Technika, 1994. 184 p.
17. Bonaccorso, A. Ground deformation of the southern sector of the Aeolian islands volcanic arc from geodetic data. *Tectonophysics*, Vol 351, No 3. Elsevier Science Publishers B. V., 2002, p. 181–192.
18. Bonaccorso, A.; Mattia, M. Deflation acting on Pantelleria island (Sicily Channel) inferred through geodetic data. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 180, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2000, p. 91–101.
19. Cai, J. Statistical inference of the eigenspace components of a symmetric random deformation tensor, Heft Nr. 577. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, 2004. 138 p.
20. Cai, J.; Grafarend, E. W.; Schaffrin, B. Statistical inference of the eigenspace components of a two-dimensional, symmetric rank-two random tensor. *Journal of Geodesy*, Vol 78, Numbers 7–8. Springer–Verlag GmbH, 2005, p. 425–436.
21. Calais, E.; Galisson, L.; Stéphan, J.-F.; Delteil, J.; Deverchère, J.; Larroque, C.; Mercier de Lépinay, B.; Popoff, M.; Sosson, M. Crustal strain in the Southern Alps, France, 1948–1998. *Tectonophysics*, Vol 319, No 1. Elsevier Science Publishers B. V., 2000, p. 1–17.
22. Caporali, A.; Martin, S.; Massironi, M. Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS network – II. Strain rate versus seismicity and structural

- geology. *Geophysical Journal International*, Vol 155, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 2003, p. 254–268.
23. Chang, C-P.; Chang, T-Y.; Angelier, J.; Kao, H.; Lee, J-C.; Yu, S-B. Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 214, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 115–127.
  24. Clarke, P. J.; Davies, R. R.; England, P. C.; Parsons, B.; Billiris, H.; Paradissis, D.; Veis, G.; Cross, P. A.; Denys, P. H.; Ashkenazi, V.; Bingley, R.; Kahle, H-G.; Muller, M-V.; Briole, P. Crustal strain in central Greece from repeated GPS measurements in the interval 1989–1997. *Geophysical Journal International*, Vol 135, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 1998, p. 195–214.
  25. Cong, D. C.; Feigl, K. L. Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam, 1963–1994. *Journal of Geodesy*, Vol 73, No 6. Springer-Verlag GmbH, 1999, p. 298–310.
  26. Čekanavičius, V.; Murauskas, G. Statistika ir jos taikymai. I. Vilnius: TEV, 2001. 240 p.
  27. Čekanavičius, V.; Murauskas, G. Statistika ir jos taikymai. II. Vilnius: TEV, 2002. 272 p.
  28. Čyras, A. Statybinė mechanika. Vilnius: Mokslas, 1990. 446 p.
  29. Čyras, A.; Borkowski, A.; Karkauskas, R. Theory and methods of optimization of rigid plastic systems. Vilnius: Technika, 2004. 354 p.
  30. Dal Moro, G.; Zadro, M. Subsurface deformations induced by rainfall and atmospheric pressure: tilt/strain measurements in the NE-Italy seismic area. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 164, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 193–203.
  31. Decker, K.; Peresson, H.; Hinsch, R. Active tectonics and Quaternary basin formation along the Vienna Basin Transform fault. *Quaternary Science Reviews*, Vol 24, Numbers 3–4. Pergamon Press – An Imprint of Elsevier Science, 2005, p. 305–320.
  32. Drew, A. R.; Snay, R. A. DYNAP: software for estimating crustal deformation from geodetic data. *Tectonophysics*, Vol 162, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1989, p. 331–343.
  33. Eitutis, A. Eksperimentinė mechanika. Kaunas: Technologija, 1998. 199 p.
  34. El-Fiky, G. S. Elastic and inelastic strains in the Japanese Islands deduced from GPS dense array. *Earth Planets and Space*, Vol 52, No 11. Terra Scientific Publishing Company, 2000, p. 1107–1112.

35. El-Fiky, G. S.; Kato, T. Continuous distribution of the horizontal strain in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation. *Journal of Geodynamics*, Vol 27, No 2. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 1999, p. 213–236.
36. Even-Tzur, G. GPS vector configuration design for monitoring deformation networks. *Journal of Geodesy*, Vol 76, No 8. Springer–Verlag GmbH, 2002, p. 455–461.
37. Ferhat, G.; Feigl, K. L.; Ritz, J-F.; Souriau, A. Geodetic measurement of tectonic deformation in the southern Alps and Provence, France, 1947–1994. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 159, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 35–46.
38. Fernandes, R. M. S.; Bastos, L.; Ambrosius, B. A. C.; Noomen, R.; Matheussen, S.; Baptista, P. Recent geodetic results in the Azores triple junction region. *Pure and Applied Geophysics*, Vol 161, No 3. Birkhäuser Verlag AG, 2004, p. 683–699.
39. Fukuda, Y.; Itahara, M.; Kusumoto, S.; Higashi, T.; Takemura, K.; Mawatari, H.; Yusa, Y.; Yamamoto, T.; Kato, T. Crustal movements around the Beppu Bay area, East-Central Kyushu, Japan, observed by GPS 1996–1998. *Earth Planets and Space*, Vol 52, No 11. Terra Scientific Publishing Company, 2000, p. 979–984.
40. Gailius, R.; Grigelis, A.; Jankauskas, T.; Juodkazis, V.; Juozapavičius, G.; Kadūnas, V.; Katinas, V.; Klimas, A. A.; Kondratas, A.; Kondratienė, O.; Linčius, A.; Mikalauskas, V.; Narbutas, V.; Paškevičius, J.; Sakalauskas, K.; Suveizdis, P.; Tarvydas, R.; Vonsavičius, V. Lietuvos geologija. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 1994. 448 p.
41. Gerbault, M.; Davey, F.; Henrys, S. Three-dimensional lateral crustal thickening in continental oblique collision: an example from the Southern Alps, New Zealand. *Geophysical Journal International*, Vol 150, No 3. Blackwell Publishing Ltd., 2002, p. 770–779.
42. Gordeev, E. I.; Gusev, A. A.; Levin, V. E.; Bakhtiarov, V. F.; Pavlov, V. M.; Chebrov, V. N.; Kasahara, M. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia–Pacific–North America plate junction from GPS data. *Geophysical Journal International*, Vol 147, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 189–198.
43. Grafarend, E. W.; Voosoghi, B. Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets). *Journal of Geodesy*, Vol 77, Numbers 5–6. Springer–Verlag GmbH, 2003, p. 303–326.

44. Grigelis, A.; Juodkasis, V.; Jurgaitis, A.; Kilkus, K. Geomokslų Lietuvoje raida, rezultatai ir perspektyvos. Iš: Geomokslai. Vilnius: Lietuvos mokslas, 23 knyga, 1999, p. 7–52.
45. Hamdy, A. M.; Park, P. H.; Lim, H. C. Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data, 2000–2003. *Earth Planets and Space*, Vol 57, No 2. Terra Scientific Publishing Company, 2005, p. 77–82.
46. Hashimoto, M.; Onoue, K.; Ohya, F.; Hosono, Y.; Segawa, K.; Sato, K.; Fujita, Y. Crustal deformations in Kii peninsula associated with the SE off the Kii peninsula earthquake sequence of September 5, 2004 derived from dense GPS observations. *Earth Planets and Space*, Vol 57, No 3. Terra Scientific Publishing Company, 2005, p. 185–190.
47. Heidbach, O. Numerische Modellierung der Lithosphärendynamik im Vergleich mit Ergebnissen aus der Satellitengeodäsie, Heft Nr. 525. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 2000. 98 s.
48. Hori, M. Stress inversion method for predicting local stress distribution of body in two-dimensional state of plane stress or strain. *Mechanics of Materials*, Vol 35, Numbers 3–6. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 395–406.
49. Hori, M.; Kameda, T.; Kato, T. Application of the inversion method to a GPS network for estimating the stress increment in Japan. *Geophysical Journal International*, Vol 144, No 3. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 597–608.
50. Hori, M.; Kameda, T.; Kato, T. Prediction of stress field in Japan using GPS network data. *Earth Planets and Space*, Vol 52, No 11. Terra Scientific Publishing Company, 2000, p. 1101–1105.
51. Hsu, Y.-J.; Simons, M.; Yu, S.-B.; Kuo, L.-C.; Chen, H.-Y. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 211, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 287–294.
52. Hsu, R.; Li, S. Decomposition of deformation primitives of horizontal geodetic networks: application to Taiwan's GPS network. *Journal of Geodesy*, Vol 78, Numbers 4–5. Springer-Verlag GmbH, 2004, p. 251–262.
53. Hughes, Thomas J. R. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Dover Publications, Inc., 2000. 682 p.
54. Ignalina control network, Lithuania. Final report. Rambøll, August 1998.
55. Ilginytė, V. Lietuvos seismiškai aktyvios tektoninės zonos. *Geologija*, Nr. 23. Vilnius, 1998, p. 61–64.

56. Ye, Z-R.; Wang, J. Dynamics of present-day crustal movement in the China mainland. *Acta Geophysica Sinica*, Vol 47, No 3. Science Press, 2004, p. 456–461.
57. Yoshioka, S. Coseismic slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake deduced from inversion analysis of GPS data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 91, No 5. Seismological Soc. America, 2001, p. 1182–1189.
58. Yu, S. B.; Chen, H. Y.; Kuo, L. C. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, Vol 274, Numbers 1–3. Elsevier Science Publishers B. V., 1997, p. 41–59.
59. Jaeger, J. C. Elasticity, fracture and flow: with engineering and geological applications. 3<sup>rd</sup> ed. London: Methuen, 1969. 268 p.
60. Janssen, V.; Rizos, C. Processing mixed-mode GPS networks for deformation monitoring applications. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Vol 128, No 2. Wißner-Verlag, 2003, p. 87–96.
61. Jiménez-Munt, I.; Negredo, A. M. Neotectonic modelling of the western part of the Africa–Eurasia plate boundary: from the Mid–Atlantic ridge to Algeria. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 205, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 257–271.
62. Jouanne, F.; Genaudeau, N.; Ménard, G.; Darmendrail, X. Estimating present-day displacement fields and tectonic deformation in active mountain belts: an example from the Chartreuse Massif and the southern Jura Mountains, western Alps. *Tectonophysics*, Vol 296, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 403–419.
63. Jouanne, F.; Hippolyte, J. C.; Gamond, J. F.; Martinod, J. Current deformation of the Digne Nappe (southwestern Alps) from a comparison between triangulation and GPS data. *Geophysical Journal International*, Vol 144, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 432–440.
64. Kačianauskas, R. Įvadas į tenzorinį skaičiavimą. Vilnius: Technika, 1997. 72 p.
65. Kahle, H-G.; Müller, M. V.; Geiger, A.; Danuser, G.; Mueller, S.; Veis, G.; Billiris, H.; Paradissis, D. The strain field in northwestern Greece and the Ionian Islands: results inferred from GPS measurements. *Tectonophysics*, Vol 249, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 1995, p. 41–52.
66. Kahle, H-G.; Straub, C.; Reilinger, R.; McClusky, S.; King, R.; Hurst, K.; Veis, G.; Kastens, K.; Cross, P. The strain rate field in the eastern Mediterranean region, estimated by repeated GPS measurements. *Tectonophysics*, Vol 294, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 237–252.

67. Kaiser, A.; Reicherter, K.; Hübscher, C.; Gajewski, D. Variation of the present-day stress field within the North German Basin—insights from thin shell FE modeling based on residual GPS velocities. *Tectonophysics*, Vol 397, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2005, p. 55–72.
68. Kazakevičius, S.; Petrulytė, E.; Stepanovienė, J. Lietuvos teritorijos trianguliacijos tinklai. Istorija ir dabartis. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(25). Vilnius: Technika, 1997, p. 18–52.
69. Kazakevičius, S.; Stepanovienė, J. Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono niveliacija. *Geodezijos darbai*, Nr. 19. Vilnius: Technika, 1994, p. 56–65.
70. Kiratzi, A. A. Stress tensor inversions along the westernmost North Anatolian Fault Zone and its continuation into the North Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, Vol 151, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2002, p. 360–376.
71. Kiratzi, A. A.; Papazachos, C. B. Active crustal deformation from the Azores triple junction to the Middle East. *Tectonophysics*, Vol 243, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 1995, p. 1–24.
72. Kuang, S. Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications. Ann Arbor Press, Inc. Chelsea, Michigan, 1996. 368 p.
73. Kuroki, H.; Ito, H. M.; Yoshida, A. A three-dimensional simulation of crustal deformation accompanied by subduction in the Tokai region, central Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol 132, Numbers 1–3. Elsevier Science Publishers B. V., 2002, p. 39–58.
74. Kvedaras, B. Matricų teorija. Kaunas: Vytauto Didžiojo universiteto leidykla, 1999. 362 p.
75. Lee, J-C.; Angelier, J.; Chu, H-T.; Hu, J-C.; Jeng, F-S. Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan. *Tectonophysics*, Vol 333, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2001, p. 219–240.
76. Legrand, D.; Calahorrano, A.; Guillier, B.; Rivera, L.; Ruiz, M.; Villagómez, D.; Yepes, H. Stress tensor analysis of the 1998–1999 tectonic swarm of northern Quito related to the volcanic swarm of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Tectonophysics*, Vol 344, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2002, p. 15–36.
77. Lesne, O.; Calais, E.; Deverchère, J. Finite element modelling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active–passive rifting debate. *Tectonophysics*, Vol 289, No 4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 327–340.

78. Lewis, J. C.; Unruh, J. R.; Twiss, R. J. Seismogenic strain and motion of the Oregon coast block. *Geology*, Vol 31, No 2. Geological Soc. America, 2003, p. 183–186.
79. Liesis, I. Dabartiniai Žemės plutos vertikalieji judesiai Pietrytiniame Pabaltijyje. *Geografinis metraštis*, T. 5. Vilnius, 1962, p. 214–320.
80. Lowry, A. R.; Hamburger, M. W.; Meertens, C. M.; Ramos, E. G. GPS monitoring of crustal deformation at Taal Volcano, Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 105, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2001, p. 35–47.
81. Madsen, F. Monitoring the crustal movements around the Ignalina nuclear power plant. In: Proceedings from Seminar of the Danish & Baltic Sector Programme held in Riga March 2 and 3, 1999. Copenhagen, 2001, p. 8–11.
82. Madsen, F.; Madsen, F. B. A new GPS – network in the Baltic countries. National Survey and Cadastre – Denmark, June 1993. 25 p.
83. Mantovani, E.; Viti, M.; Albarello, D.; Tamburelli, C.; Babbucci, D.; Cenni, N. Role of kinematically induced horizontal forces in Mediterranean tectonics: insights from numerical modeling. *Journal of Geodynamics*, Vol 30, No 3. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 2000, p. 287–320.
84. Marcinkevičius, V.; Laškovas, J. Ignalinos atominės elektrinės rajono tektoninės sąlygos. *Geologijos akiračiai*, Nr. 1–2. Vilnius, 1996, p. 8–23.
85. Marotta, A. M.; Bayer, U.; Thybo, H.; Scheck, M. Origin of the regional stress in the North German basin: results from numerical modelling. *Tectonophysics*, Vol 360, Numbers 1–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2002, p. 245–264.
86. Marotta, A. M.; Sabadini, R. The signatures of tectonics and glacial isostatic adjustment revealed by the strain rate in Europe. *Geophysical Journal International*, Vol 157, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2004, p. 865–870.
87. McKenzie, D.; Jackson, J. The relationship between strain rates, crustal thickening, palaeomagnetism, finite strain and fault movements within a deforming zone. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 65, No 1. Elsevier Science Publishers B. V., 1983, p. 182–202.
88. Michel, G. W.; Becker, M.; Angermann, D.; Reigber, C.; Reinhart, E. Crustal motion in E- and SE-Asia from GPS measurements. *Earth Planets and Space*, Vol 52, No 10. Terra Scientific Publishing Company, 2000, p. 713–720.
89. Michel, G. W.; Yu, Y. Q.; Zhu, S. Y.; Reigber, C.; Becker, M.; Reinhart, E.; Simons, W.; Ambrosius, B.; Vigny, C.; Chamot-Rooke, N.; Le Pichon, X.; Morgan, P.; Matheussen, S. Crustal motion and block behaviour in SE-Asia from GPS

- measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 187, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2001, p. 239–244.
90. Miura, S.; Sato, T.; Tachibana, K.; Satake, Y.; Hasegawa, A. Strain accumulation in and around Ou Backbone Range, northeastern Japan as observed by a dense GPS network. *Earth Planets and Space*, Vol 54, No 11. Terra Scientific Publishing Company, 2002, p. 1071–1076.
91. Motuza, G.; Skridlaitė, G. Lietuvos gilieji litosferos sluoksniai. Iš: Geomokslai. Vilnius: Lietuvos mokslas, 23 knyga, 1999, p. 63–80.
92. Mrlina, J.; Špičák, A.; Skalský, L. Non–seismological indications of recent tectonic activity in the West Bohemia earthquake swarm region. *Journal of Geodynamics*, Vol 35, Numbers 1–2. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 2003, p. 221–234.
93. Muñoz-Martín, A.; Cloetingh, S.; De Vicente, G.; Andeweg, B. Finite-element modelling of Tertiary paleostress fields in the eastern part of the Tajo Basin (central Spain). *Tectonophysics*, Vol 300, Numbers 1–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 47–62.
94. Nakamura, M. Crustal deformation in the central and southern Ryukyu Arc estimated from GPS data. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 217, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2004, p. 389–398.
95. Nazarovà, L. A.; Nazarov, L. A.; Kuchai, O. A.; Kesel'man, S. I. Estimate of stress field variation in the outer crust of the earth using geodetic data. *Journal of Mining Science*, Vol 38, No 1. Consultants Bureau, 2002, p. 9–19.
96. Niemeier, W.; Rennen, M.; Salbach, H. Bestimmung regionaler und globaler Deformationen im Bereich der Antarktischen Halbinsel. Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Heft Nr. 310. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 2000, s. 109–126.
97. Nilforoushan, F.; Masson, F.; Vernant, P.; Vigny, C.; Martinod, J.; Abbassi, M.; Nankali, H.; Hatzfeld, D.; Bayer, R.; Tavakoli, F.; Ashtiani, A.; Doerflinger, E.; Daignières, M.; Collard, P.; Chéry, J. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy*, Vol 77, Numbers 7–8. Springer–Verlag GmbH, 2003, p. 411–422.
98. Nkuite, G. Ausgleichung mit singulärer Varianzkovarianzmatrix am Beispiel der geometrischen Deformationsanalyse, Heft Nr. 501. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 1998. 85 s.

99. Nocquet, J. M.; Calais, E. Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophysical Journal International*, Vol 154, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 2003, p. 72–88.
100. Nocquet, J. M.; Calais, E. Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, Vol 161, No 3. Birkhäuser Verlag AG, 2004, p. 661–681.
101. Pačėsa, A.; Šliaupa, S.; Satkūnas, J. Naujausi Žemės drebėjimai ir seismologinis monitoringas Lietuvoje. *Geologija*, Nr. 50. Vilnius, 2005, p. 8–18.
102. Papadimitriou, E. E.; Sykes, L. R. Evolution of the stress field in the northern Aegean Sea (Greece). *Geophysical Journal International*, Vol 146, No 3. Blackwell Publishing Ltd., 2001, p. 747–759.
103. Park, P. H.; Chwae, U.; Ahn, Y. W.; Choi, K. H. Preliminary GPS results and a possible neotectonic interpretation for South Korea. *Earth Planets and Space*, Vol 53, No 9. Terra Scientific Publishing Company, 2001, p. 937–941.
104. Paršeliūnas, E. Geoinformacinės sistemos: technologija. Vilnius: Technika, 2001. 229 p.
105. Petroškevičius, P. Gravitacijos lauko poveikis geodeziniam matavimams. Vilnius: Technika, 2004. 292 p.
106. Petroškevičius, P.; Kazakevičius, S.; Kolosovskis, R.; Krikštaponis, B.; Putrimas. Lietuvos valstybinis GPS tinklas. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 2(26). Vilnius: Technika, 1997, p. 5–20.
107. Petroškevičius, P.; Putrimas, R.; Krikštaponis, B.; Būga, A.; Neseckas, A.; Obuchovski, R.; Stepanovienė, J.; Tumelienė, E.; Viskontas, P.; Zigmantienė, E. Analysis of normal height differences determination in Lithuanian national geodetic vertical network. In: The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering” Selected Papers, Vol. II. Vilnius: Technika, 2005, p. 975–984.
108. Petroškevičius, P.; Ramanauskas, R. Lietuvos valstybinio GPS tinklo sudarymas. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(21). Vilnius: Technika, 1995, p. 3–20.
109. Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A. On the development of the Lithuanian vertical network. In: Proceedings from Seminar of the Danish & Baltic Sector Programme held in Riga March 2 and 3, 1999. Copenhagen, 2001, p. 72–82.
110. Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A.; Tulevičius, V. Possibilities of the geodynamic investigations in Lithuania. In: Studies of the Baltic Sea. Published by Astronomical Observatory of University of Latvia. Riga: University of Latvia, 1996, p. 18–32.
111. Pinar, A.; Kuge, K.; Honkura, Y. Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea

- of Marmara. *Geophysical Journal International*, Vol 153, No 1. Blackwell Publishing Ltd., 2003, p. 133–145.
112. Provost, A. S.; Chéry, J.; Hassani, R. 3D mechanical modeling of the GPS velocity field along the North Anatolian fault. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 209, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 361–377.
113. Puglisi, G.; Bonforte, A.; Maugeri, S. R. Ground deformation patterns on Mount Etna, 1992 to 1994, inferred from GPS data. *Bulletin of Volcanology*, Vol 62, Numbers 6–7. Springer–Verlag GmbH, 2001, p. 371–384.
114. Qin, C.; Papazachos, C.; Papadimitriou, E. Velocity field for crustal deformation in China derived from seismic moment tensor summation of earthquakes. *Tectonophysics*, Vol 359, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2002, p. 29–46.
115. Rao, S. S. The finite element method in engineering. Third edition. Butterworth–Heinemann, 1999. 556 p.
116. Rawiel, P. Dreidimensionale kinematische Modelle zur Analyse von Deformationen an Hängen, Heft Nr. 533. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 2001. 96 s.
117. Reddy, C. D.; El-Fiky, G.; Kato, T.; Shimada, S.; Kumar, K. V. Crustal strain fields in the Deccan trap region, western India, derived from GPS measurements. *Earth Planets and Space*, Vol 52, No 11. Terra Scientific Publishing Company, 2000, p. 965–969.
118. Rolandone, F.; Jaupart, C. The distributions of slip rate and ductile deformation in a strike slip shear zone. *Geophysical Journal International*, Vol 148, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2002, p. 179–192.
119. Rossikopoulos, D.; Fotiou, A.; Livieratos, E.; Baldi, P. A rigorous analysis of GPS data to detect crustal deformations. Application in the area of the Ionian Sea. *Tectonophysics*, Vol 294, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 271–280.
120. Rudzkienė, V.; Kulvietienė, R. Kompiuterinė duomenų analizė. Vilnius: Technika, 1995. 47 p.
121. Ruiz, A. M.; Ferhat, G.; Alfaro, P.; Sanz de Galdeano, C.; de Lacy, M. C.; Rodríguez-Caderot, G.; Gil, A. J. Geodetic measurements of crustal deformation on NW–SE faults of the Betic Cordillera, southern Spain, 1999–2001. *Journal of Geodynamics*, Vol 35, No 3. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 2003, p. 259–272.

122. Sagiya, T.; Miyazaki, S.; Tada, T. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol 157, Numbers 11–12. Birkhäuser Verlag AG, 2000, p. 2303–2322.
123. Sakalauskas, V. Duomenų analizė su STATISTICA. Vilnius: Margi raštai, 2003. 236 p.
124. Sauber, J. M.; Molnia, B. F. Glacier ice mass fluctuations and fault instability in tectonically active Southern Alaska. *Global and Planetary Change*, Vol 42, Numbers 1–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2004, p. 279–293.
125. Serpelloni, E.; Anzidei, M.; Baldi, P.; Casula, G.; Galvani, A.; Pesci, A.; Riguzzi, F. Geodetic deformations in the central-southern Apennines (Italy) from repeated GPS surveys. *Annali di Geofisica*, Vol 44, No 3. Editrice Compositori, 2001, p. 627–647.
126. Skeivalas, J. Koreliuotų geodezinių matavimų rezultatų matematinis apdorojimas. Vilnius: Technika, 1995. 272 p.
127. Skeivalas, J. Metrologinių ir geodezinių matavimų apdorojimas. Vilnius: Technika, 2001. 220 p.
128. Skeivalas, J.; Paršeliūnas, E.; Ramanauskas, R. Lietuvos GPS pirmosios klasės tinklo matavimų rezultatų apdorojimas ir išlyginimas. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(21). Vilnius: Technika, 1995, p. 21–30.
129. Skeivalas, J.; Petroškevičius, P. Nauji geodezijos metodai Žemės formos ir gravitacijos lauko tyrimuose. Iš: *Geomokslai*. Vilnius: Lietuvos mokslas, 23 knyga, 1999, p. 473–489.
130. Snay, R. A.; Matsikari, T. Horizontal deformation in the Cascadia subduction zone as derived from serendipitous geodetic data. *Tectonophysics*, Vol 194, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 1991, p. 59–67.
131. Ströbel, D. Die Anwendung der Ausgleichungsrechnung auf elastomechanische Systeme, Heft Nr. 478. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 1997. 131 s.
132. Sue, C.; Martinod, P.; Tricart, P.; Thouvenot, F.; Gamond, J-F.; Fréchet, J.; Marinier, D.; Glot, J-P.; Grasso, J-R. Active deformation in the inner Western Alps inferred from comparison between 1972–classical and 1996–GPS geodetic surveys. *Tectonophysics*, Vol 320, No 1. Elsevier Science Publishers B. V., 2000, p. 17–29.
133. Suito, H.; Iizuka, M.; Hirahara, K. 3-D viscoelastic FEM modeling of crustal deformation in northeast Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol 159, No 10. Birkhäuser Verlag AG, 2002, p. 2239–2259.

134. Suveizdis, P. Geologija ir atominės elektrinės. *Geologijos akiračiai*, Nr. 3. Vilnius, 1991, p. 10–12.
135. Suveizdis, P. (red.). Lietuvos tektoninė sandara. Geologijos ir geografijos institutas, Vilnius, 2003. 160 p.
136. Suveizdis, P. Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės ir Baltijos sineklizės sandūros zonos tektonikos ypatumai. Iš: Gelmių geologinio tyrimo, naudojimo ir apsaugos problemos Lietuvoje. Vilnius, 1994, p. 73–74.
137. Šliaupa, A. Neotectonic structures of Lithuania and adjacent territories. *Litosfera*, No 2. Vilnius, 1998, p. 37–46.
138. Šliaupa, S. Establishment of Ignalina GPS geodynamic polygon. Geological Survey of Lithuania, Annual Report of 1998. Vilnius, 1999, p. 37–39.
139. Šliaupa, S. Lietuvos geodinaminio monitoringo sub–programa. Lietuvos geologijos tarnyba. Vilnius, 1997. 29 p.
140. Šliaupa, S. Programme of geodynamic monitoring of Lithuania. *Geologijos akiračiai*, Nr. 3. Vilnius, 1998, p. 52–59.
141. Šliaupa, S.; Bitinas, A.; Zakarevičius, A. Predictive model of the vertical movements of the Earth's surface: implications for the land use of the Lithuanian coastal area. In: 33<sup>e</sup> Symposium International FESF Strasbourg, Recent Developments in Environmental Protection, Vol 40. Peter Lang AG, Bern, 2005, p. 221–235.
142. Taylor, R. L.; Beresford, P. J.; Wilson, E. L. A non–conforming element for stress analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 10, 1976, p. 1211–1219.
143. Talich, M. Geodynamika s GPS. *Sborník prací 1996*, Roč. 41. Zdíby: VÚGTK, 1997, s. 31–40. URL: <http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/sb96/talich.htm> (2005.09.14).
144. Tamutis, Z.; Žalnierukas, A.; Kazakevičius, S.; Petroškevičius, P. Geodezija 2. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 1996. 384 p.
145. Toya, Y.; Kasahara, M. Robust and exploratory analysis of active mesoscale tectonic zones in Japan utilizing the nationwide GPS array. *Tectonophysics*, Vol 400, Numbers 1–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2005, p. 27–53.
146. Tracevičienė, R. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų skaičiavimas pagal nuosėdinės dangos sluoksnių geometriją. *Geodezija ir kartografija*, XXVII t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2001, p. 87–91.
147. Trenkamp, R.; Kellogg, J. N.; Freymueller, J. T.; Mora, H. P. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS

- observations. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol 15, No 2. Pergamon Press – An Imprint of Elsevier Science, 2002, p. 157–171.
148. Tsenkov, T.; Gospodinov, S. Determination of 2D – tectonic deformations using affine transformation. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Vol 127, No 4. Wißner-Verlag, 2002, p. 262–264.
149. Tzanis, A.; Vallianatos, F. Distributed power-law seismicity changes and crustal deformation in the SW Hellenic ARC. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol 3, No 3–4. *NHESS* is published by Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union (EGU), 2003, p. 179–195.
150. Vainauskas, V. Fotogrametriniai ir distanciniai metodai šiuolaikinėje kartografijoje. Iš: *Geomokslai*. Vilnius: Lietuvos mokslas, 23 knyga, 1999, p. 502–512.
151. Vaníček, P.; Craymer, M. R.; Krakiwsky, E. J. Robustness analysis of geodetic horizontal networks. *Journal of Geodesy*, Vol 75, No 4. Springer-Verlag GmbH, 2001, p. 199–209.
152. Vaníček, P.; Krakiwsky, E. J. *Geodesy: The concepts*. 2<sup>nd</sup> rev. ed. North-Holland, Amsterdam, 1986. 697 p.
153. Varadan, T. K.; Bhaskar, K. *Analysis of plates: theory and problems*. Narosa Publishing House, 1999. 190 p.
154. Vasiliauskiėnė, L.; Baušys, R. Intelligent initial finite element mesh generation for solutions of 2D problems. *Informatica*, Vol 13, No 2. Institute of Mathematics and Informatics, Lithuanian Academy of Sciences, 2002, p. 239–250.
155. Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žiburio leidykla, 2000. 380 p.
156. Verdonck, D. An inverse dislocation model of surface deformation in western Washington. *Tectonophysics*, Vol 395, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2005, p. 179–191.
157. Vigny, C.; Chéry, J.; Duquesnoy, T.; Jouanne, F.; Ammann, J.; Anzidei, M.; Avouac, J. P.; Barlier, F.; Bayer, R.; Briole, P.; Calais, E.; Cotton, F.; Duquenne, F.; Feigl, K. L.; Ferhat, G.; Flouzat, M.; Gamond, J. F.; Geiger, A.; Harmel, A.; Kasser, M.; Laplanche, M.; Le Pape, M.; Martinod, J.; Ménard, G.; Meyer, B.; Ruegg, J. C.; Scheubel, J. M.; Scotti, O.; Vidal, G. GPS network monitors the Western Alps' deformation over a five-year period: 1993–1998. *Journal of Geodesy*, Vol 76, No 2. Springer-Verlag GmbH, 2002, p. 63–76.
158. Viola, G.; Andreoli, M.; Ben-Avraham, Z.; Stengel, I.; Reshef, M. Offshore mud volcanoes and onland faulting in southwestern Africa: neotectonic implications and

- constraints on the regional stress field. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 231, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2005, p. 147–160.
159. Vodopivec, F.; Kogoj, D.; Stopar, B. The use of GPS in the fourth EPOCH measurements of crustal movements along the Ljubljana fault. *Journal of Geodynamics*, Vol 18, Numbers 1–4. Pergamon–Elsevier Science Ltd., 1993, p. 123–133.
160. Wang, S.; Chen, P. A numerical simulation of the present tectonic stress field of China and its vicinity. *Acta Geophysica Sinica*, Vol 23, No 1. Science Press, 1980, p. 35–45.
161. Ward, S. N. On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. *Geophysical Journal International*, Vol 135, No 3. Blackwell Publishing Ltd., 1998, p. 1011–1018.
162. Wendt, J. Zur Geokinematik im sächsischen Vogtland, Heft Nr. 517. Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 1999. 124 s.
163. Wilson, E. L.; Taylor, R. L.; Doherty, W. P.; Ghaboussi, J. Incompatible displacement models. *Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics*, edited by S. J. Fenves, et al, Academic Press, Inc., N. Y. and London, 1973, p. 43–57.
164. Zadro, M.; Braitenberg, C. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth–Science Reviews*, Vol 47, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1999, p. 151–187.
165. Zakarevičius, A. Adaptyvinio eksponentinio modelio panaudojimas analizuoti Ignalinos AE geodinaminio poligono niveliavimo rezultatus. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 2(22). Vilnius: Technika, 1995, p. 81–89.
166. Zakarevičius, A. Dabartiniai Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės rajone. Iš: *Geomokslai*. Vilnius: Lietuvos mokslas, 23 knyga, 1999, p. 490–501.
167. Zakarevičius, A. Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas. Vilnius: Technika, 2003. 195 p.
168. Zakarevičius, A. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas. Vilnius: Technika, 1994. 276 p.
169. Zakarevičius, A. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir geologinės sandaros sąsajos pietų Lietuvoje. *Geodezija ir kartografija*, XXVIII t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2002, p. 29–34.
170. Zakarevičius, A. Erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzorių ir deformacijų rodiklių įvertinimas. *Geodezija ir kartografija*, XXVI t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2000, p. 39–42.

171. Zakarevičius, A. Horizontaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo metodikų ypatumai. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(23). Vilnius: Technika, 1996, p. 96–103.
172. Zakarevičius, A. Investigation of the recent movements Earths crust in the territory of the Lithuania. Summary of the research report presented for habilitation. Vilnius: Technika, 1999. 36 p.
173. Zakarevičius, A. Koordinačių sistema LKS 94. Vilnius: Technika, 2000. 62 p.
174. Zakarevičius, A. Lietuvos geodezinio tinklo horizontaliosios deformacijos. *Geodezija ir kartografija*, XXIV t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 1998, p. 169–178.
175. Zakarevičius, A. Lietuvos geodezinių tinklų koordinačių sistemos ir jų ryšiai. Vilnius: Technika, 1996. 200 p.
176. Zakarevičius, A. Lietuvos teritorijos Žemės plutos dabartinio geodinaminio aktyvumo ir neotektoninio fono sąsajos. *Geodezija ir kartografija*, XXVI t., Nr. 3. Vilnius: Technika, 2000, p. 111–115.
177. Zakarevičius, A. Nulinės klasės GPS tinklo deformacijų analizė. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(23). Vilnius: Technika, 1996, p. 53–61.
178. Zakarevičius, A. Pabaltijo pakartotų niveliacijų tikslumo analizė modeliavimo būdu. *Geodezijos darbai*, Nr. 12. Vilnius, 1983, p. 38–46.
179. Zakarevičius, A. Skaitmeniniai vertikaliųjų Žemės plutos deformacijų rodikliai. *Geodezija ir kartografija*, XXVI t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2000, p. 57–59.
180. Zakarevičius, A. The results of investigations into vertical movements of the Earth's crust in Ignalina nuclear power plant geodynamic polygon. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(25). Vilnius: Technika, 1997, p. 78–85.
181. Zakarevičius, A. Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone analizė. *Geodezijos darbai*, Nr. 20. Vilnius: Technika, 1994, p. 7–19.
182. Zakarevičius, A. Vertikaliųjų ir horizontaliųjų Žemės plutos judesių sąsajos. *Geodezija ir kartografija*, XXIV t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 1998, p. 185–192.
183. Zakarevičius, A. Žemės paviršiaus judesių matavimo ir geologinių rodiklių sąsajų informatyvumas. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2003, p. 51–56.
184. Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A. Modelling of the horizontal strains and stresses of the Earth-crust according to the data of geodetic measurements. *Geodetski vestnik (Journal of the Association of Surveyors of Slovenia)*, Vol 49, No 2. Ljubljana, 2005, p. 191–207.

185. Zakarevičius, A.; Česnauskienė, J. Vertikalūs Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono šiaurinėje dalyje. *Geodezija ir kartografija*, Nr. 1(21). Vilnius: Technika, 1995, p. 77–81.
186. Zakarevičius, A.; Putrimas, R. Ryšiai tarp geodezinių tinklų koordinačių sistemų. Vilnius: Technika, 1995. 36 p.
187. Zakarevičius, A.; Pūzienė, R.; Stanionis, A. Koordinačių sistemų paklaidų įtaka Žemės plutos deformacijų rodiklių įvertinimams. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2005, p. 32–37.
188. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Geodinaminių Žemės plutos įtampų pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės regione. *Geodezija ir kartografija*, XXX t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2004, p. 107–111.
189. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afiniojo koordinačių perskaičiavimo būdu. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2003, p. 13–19.
190. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone sklaidos ypatumai. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2003, p. 119–123.
191. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos poslinkių ir deformacijų modeliavimas baigtinių elementų metodu. *Geodezija ir kartografija*, XXX t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2004, p. 35–40.
192. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Lietuvos geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų sklaidos struktūra. *Geodezija ir kartografija*, XXVIII t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2002, p. 117–124.
193. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Žemės plutos horizontaliųjų judesių tyrimas Ansys programa. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2005, p. 3–11.
194. Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Šliaupa, S.; Stephenson, R. Crustal deformations of the GPS polygon of the Ignalina NPP: application of finite element modelling for geodynamic implications. In: The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering” Selected Papers, Vol. II. Vilnius: Technika, 2005, p. 1041–1047.
195. Zakarevičius, A.; Stankevičius, Ž. Netolygiųjų atsitiktinių deformacijų sumažinimas transformuojant fragmentiškai. *Geodezija ir kartografija*, XXV t., Nr. 3. Vilnius: Technika, 1999, p. 123–127.
196. Zakarevičius, A.; Stepanovienė, J.; Ramanauskas, R. Vertikalių Žemės paviršiaus judesių Ignalinos atominės elektrinės teritorijoje dispersinė analizė. *Geodezijos darbai*, Nr. 19. Vilnius: Technika, 1994, p. 101–108.

197. Zakarevičius, A.; Šliaupa, S.; Pūzienė, R.; Anikėnienė, A.; Būga, A.; Dėnas, Ž. Tectonic interpretation of measured recent movements of the Earth surface of sedimentary basin. In: The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering” Selected Papers, Vol. II. Vilnius: Technika, 2005, p. 1034–1040.
198. Zhao, S.; Müller, R. D.; Takahashi, Y.; Kaneda, Y. 3-D finite-element modelling of deformation and stress associated with faulting: effect of inhomogeneous crustal structures. *Geophysical Journal International*, Vol 157, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2004, p. 629–644.
199. Zhao, S.; Takemoto, S. Aseismic fault movement before the 1995 Kobe earthquake detected by a GPS survey: implication for preseismic stress localization? *Geophysical Journal International*, Vol 135, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 1998, p. 595–606.
200. Zhao, S.; Wu, X.; Hori, T.; Kaneda, Y.; Takemoto, S. Crustal deformation and stress localization in Kanto-Tokai, central Japan revealed by GPS. *Geophysical Journal International*, Vol 157, No 2. Blackwell Publishing Ltd., 2004, p. 737–752.
201. Zhao, S.; Wu, X.; Hori, T.; Smith, A.; Kaneda, Y.; Takemoto, S. Deformation and stress localization at the Nankai subduction zone, southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 206, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 145–160.
202. Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. The finite element method. Volume 1, Fifth edition. Butterworth–Heinemann, 2000. 689 p.
203. Zoback, M. L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map project. *Journal of Geophysical Research*, Vol 97, No B8. American Geophysical Union, 1992, p. 11703–11728.
204. Аксамитаускас, Ч.; Закарявичюс, А.; Крикштапонис, Б.; Петрошкявичюс, П. Геодезическая вертикальная сеть Литвы. *Інженерна геодезія*, № 50. Киев: Кнуба, 2004, с. 11–23.
205. Антонович, К. М.; Карпик, А. П. Мониторинг объектов с применением GPS – технологий. *Геодезия и Аэрофотосъемка*, № 1. Москва, 2004, с. 53–67.
206. Баборыкин, А.; Коженев, В.; Нагорный, М.; Силдвее, Х.; Сувейздис, П.; Илгините, В. Зоны активных разломов территории Беларуси и государств Балтии. В кн.: Сейсмогеологические исследования. Минск: АН Беларуси, 1995. с. 86–87.
207. Бочаров, Г. В.; Есиков, Н. П.; Замараев, Н. Н.; Фотиади, Э. Э.; Чуприна, Е. П.; Юренас, Д. Я. Горизонтальные движения и тектонофизическое районирование Земной поверхности на Южно-Якутском геодинамическом полигоне. В кн.: Современные движения Земной коры. Москва, 1987. с. 44–49.

208. Бочаров, Г. В.; Петров, А. Ф.; Козьмин, Б. М.; Шибает, С. В. Геодезический мониторинг геодинамических процессов в Якутии. *Геодезия и Картография*, № 2. Москва: Картгеоцентр–Геодезиздат, 2005, с. 18–20.
209. Григоренко, А. Г.; Кюнтцель, В. В.; Новак, В. Е.; Тамутис, З. П. Инженерная геодинамика. Киев: Лыбидь, 1992. 296 с.
210. Гуделис, В. Рельеф и четвертичные отложения Прибалтики. Вильнюс: Минтис, 1973. 264 с.
211. Дубровский, В. А. Роль неустойчивости в системе литосфера–астеносфера и осадконакопления на ранней стадии тектонических движений. В кн.: Строение и динамика зон перехода от континента к океану. Москва: Наука, 1986, с. 158–163.
212. Дюк, В. Обработка данных на ПК в примерах. Санкт–Петербург: Питер, 1997. 240 с.
213. Есиков, Н. Тектонофизические аспекты анализа современных движений Земной поверхности. Новосибирск: Наука, 1979. 182 с.
214. Закарявичюс, А.; Аксамитаускас, Ч.; Станионис, А. Горизонтальные деформации Земной коры в районе Игналинской атомной электростанции. *Інженерна геодезія*, № 49. Киев: Кнуба, 2003, с. 102–110.
215. Закарявичюс, А.; Аксамитаускас, Ч.; Станионис, А. Моделирование горизонтальных деформаций Земной коры методом конечных элементов. *Інженерна геодезія*, № 50. Киев: Кнуба, 2004, с. 61–71.
216. Закарявичюс, А.; Гуделис, В. Некоторые вопросы количественного анализа карт современных движений Земной коры на территории Прибалтики. В кн.: Современные движения Земной коры. Киев: Наукова думка, 1980, с. 28–32.
217. Закарявичюс, А.; Рузгене, Б. Корреляционный анализ карт современных движений Земной коры на территории Литвы. *Труды по геодезии*, Т. 10. Вильнюс, 1980, с. 31–35.
218. Закарявичюс, А.; Станионис, А. Определение геодинамических деформаций и напряжений Земной коры региона Игналинской атомной электростанций по результатам геодезических измерений. In: Proceedings of the International Scientific Methodical Conference „Land use and land management”. Kaunas, Akademija, 2004, с. 90–93.
219. Заключение рабочей группы по оценке сейсмических условий площадки Игналинской АЭС. М., 1988. 61 с.

220. Касаткин, Б. С.; Кудрин, А. Б.; Лобанов, Л. М.; Пивторак, В. А.; Полухин, П. И.; Чиченев, Н. А. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Киев: Наукова Думка, 1981. 583 с.
221. Лесис, И. Современные движения Земной коры на территории юго-западной Прибалтики по данным точных и высокоточных нивелировок. В кн.: Неотектонические движения в Прибалтике. Тарту, 1960, с. 42–55.
222. Лесис, И.; Гуделис, В. Вертикальные движения Земной коры на территории юго-западной Прибалтики. В кн.: Неотектоника СССР. Рига, 1961, с. 117–131.
223. Марков, Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Ленинград: Наука, 1977. 213 с.
224. Маркузе, Ю. И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей. Москва: Недра, 1982. 191 с.
225. Панжин, А. А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций Земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS. Геомеханика в горном деле – 2000: Материалы Международной конференции. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000, с. 320–324.
226. Панюков, П. Н. Инженерная геология. Москва: Недра, 1978. 296 с.
227. Пеллинен, Л. П. Высшая геодезия. Москва: Недра, 1978. 264 с.
228. Писаренко, Г. С.; Яковлев, А. П.; Матвеев, В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова Думка, 1988. 736 с.
229. Рандярв, Ю. Характер и скорости современных движений Земной коры в Прибалтике. *Современные движения Земной коры*, № 3. Москва, 1968, с. 200–210.
230. Родионов, Д. А. Статистические решения в геологии. Москва: Недра, 1981. 231 с.
231. Сашурин, А. Д.; Ручкин, В. И.; Панжин, А. А.; Дубовик, В. В. Мониторинг напряженно-деформированного состояния верхней части Земной коры на шахте Сарановская–Рудная. Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): Доклады Международной конференции 6–10 июля 1998 г. Екатеринбург: УрО РАН, 1998, с. 192–198.
232. Сидоров, В. А.; Кузьмин, Ю. О. Современные движения Земной коры осадочных бассейнов. Москва, 1989. 184 с.
233. Староверов, В. С.; Гуляев, Ю. Ф. К определению мест закладки деформационных знаков при определении осадок инженерных сооружений. *Инженерна геодезія*, № 49. Киев: Кнуба, 2003, с. 219–233.
234. Сувейздис, П. (отв. ред.). Тектоника Прибалтики. Вильнюс: Мокслас, 1979. 92 с.

235. Сувейздис, П. Тектоническое толкование сейсмических явлений Прибалтики. Сейсмологические и геотермические исследования на западе СССР. Минск: Наука и техника, 1993, с. 50–53.
236. Юкнялис, И.; Марцинкявичюс, В.; Шештокас, И.; Шляупа, А. Разломы района Игналинской АЭС. В кн.: Проблемы экологической геологии в Прибалтике и Белоруссии. Тезисы докладов совещания в Вильнюсе. Вильнюс, 1990, с. 54–57.

## AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose

- 1A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Žemės plutos horizontaliųjų judesių tyrimas *Ansysis* programa. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2005, p. 3–11.
- 2A. Zakarevičius, A.; Pūzienė, R.; Stanionis, A. Koordinačių sisteminių paklaidų įtaka Žemės plutos deformacijų rodiklių įverčiams. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2005, p. 32–37.
- 3A. Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A. Modelling of the horizontal strains and stresses of the Earth–crust according to the data of geodetic measurements. *Geodetski vestnik (Journal of the Association of Surveyors of Slovenia)*, Vol 49, No 2. Ljubljana, 2005, p. 191–207.
- 4A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Geodinaminių Žemės plutos įtampų pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės regione. *Geodezija ir kartografija*, XXX t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2004, p. 107–111.
- 5A. Закарявичюс, А.; Аксамитаускас, Ч.; Станионис, А. Моделирование горизонтальных деформаций Земной коры методом конечных элементов. *Інженерна геодезія*, № 50. Киев: Кнуба, 2004, с. 61–71.
- 6A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos poslinkių ir deformacijų modeliavimas baigtinių elementų metodu. *Geodezija ir kartografija*, XXX t., Nr. 2. Vilnius: Technika, 2004, p. 35–40.
- 7A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone sklaidos ypatumai. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2003, p. 119–123.
- 8A. Закарявичюс, А.; Аксамитаускас, Ч.; Станионис, А. Горизонтальные деформации Земной коры в районе Игналинской атомной электростанции. *Інженерна геодезія*, № 49. Киев: Кнуба, 2003, с. 102–110.
- 9A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afiniojo koordinačių perskaičiavimo būdu. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 1. Vilnius: Technika, 2003, p. 13–19.
- 10A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Lietuvos geodezinių tinklų horizontaliųjų deformacijų sklaidos struktūra. *Geodezija ir kartografija*, XXVIII t., Nr. 4. Vilnius: Technika, 2002, p. 117–124.

**Publikacijos tarptautinių ir Lietuvos mokslo konferencijų darbų leidiniuose**

- 11A. Zakarevičius, A.; Stanionis, A.; Šliaupa, S.; Stephenson, R. Crustal deformations of the GPS polygon of the Ignalina NPP: application of finite element modelling for geodynamic implications. In: The 6<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering” Selected Papers, Vol. II. Vilnius: Technika, 2005, p. 1041–1047 (*in ISI Proceedings data base*).
- 12A. Aksamitauskas, Č.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Modelling of deformations and stresses of the Earth-crust in the zones of ecologically dangerous objects. In: International Symposium on Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, Programme and Abstracts. University of Jaén, Valencia, Spain, 2005, p. 81–82.
- 13A. Aksamitauskas, Č.; Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Geodetic measurements for the estimation of eco-geodynamic risks in the area of the Ignalina nuclear power plant. In: 33<sup>e</sup> Symposium International FESF Strasbourg, Recent Developments in Environmental Protection, Vol. 40. Bern, Berlin, Bruxelles, Frankfurt am Main, New York, Oxford, Wien: Peter Lang AG, European Academic Publishers, 2005, p. 237–251.
- 14A. Stanionis, A. Tektoninių įtempimų modeliavimas panaudojant GPS monitoringo duomenis. 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities”, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2005, p. 279–286.
- 15A. Stanionis, A. Ignalinos atominės elektrinės regiono dabartinis tektoninis aktyvumas. 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities”, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2004, p. 188–195.
- 16A. Закарявичюс, А.; Станионис, А. Определение геодинамических деформаций и напряжений Земной коры региона Игналинской атомной электростанций по результатам геодезических измерений. In: Proceedings of the International Scientific Methodical Conference „Land use and land management”. Kaunas, Akademija, 2004, с. 90–93.