VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Asta ANIKĖNIENĖ

DABARTINIŲ VERTIKALIŲJŲ ŽEMĖS PLUTOS JUDESIŲ TYRIMAS IR MODELIAVIMAS TAIKANT GEODEZINIUS MATAVIMUS (LIETUVOS TERITORIJOS PAVYZDŽIU)

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Matavimų inžinerija (10 T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

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

Darbo mokslinis konsultantas

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

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1564-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-375-1

© Anikėnienė, A. 2008
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2008

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Asta ANIKĖNIENĖ

RESEARCH AND MODELING OF THE RECENT VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST ON THE BASIS OF GEODETIC MEASUREMENTS (SAMPLES ON LITHUANIAN TERRITORY)

Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Measurement Engineering (10T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2008

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami dabartiniai vertikalieji Žemės plutos judesių greičiai taikant teritorijos georodiklių koreliacinę, regresinę ir daugiakriterinę analizę. Pagrindinis tyrimo objektas – dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių dėsningumai, sąsajos su teritorijos georodikliais, judesių prognozavimo modeliai ir vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio sudarymo metodika. Eksperimentinis objektas – Lietuvos teritorija.

Pagrindinis disertacijos tikslas – parengti geodeziniais metodais išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių modeliavimo bei vertinimo metodiką ir ją taikant sudaryti Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį.

Siekiant įgyvendinti užsibrėžtą tikslą, išspręsti šie uždaviniai: 1) remiantis kartotinių niveliacijų duomenimis, nustatytos išmatuotų dabartinių Žemės plutos judesių reikšmės; 2) ištirti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaitos dėsningumai; 3) ištirtos ir nustatytos išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajos; 4) išnagrinėtos regresinių modelių taikymo dabartiniams vertikaliesiems Žemės plutos judesiams prognozuoti galimybės ir parengtos rekomendacijos juos taikyti sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapius; 5) įvertinti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai prognozavimo modeliai taikant daugiakriterinės analizės metodiką; 6) taikant pasiūlytą metodiką, sudarytas Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis.

Nustatyta, kad regresiniai prognozavimo modeliai ir jais remiantis sudarytas vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis su tikimybe ne mažesne už 0,95 adekvatus geodeziniams matavimams, todėl galima teigti, kad siūloma metodika tinka vertikaliesiems Žemės plutos judesiams tirti, modeliuoti ir žemėlapiams sudaryti.

Disertaciją sudaro šeši skyriai, iš jų – įvadas ir išvados. Disertacijos tema perskaityta 15 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose ir paskelbta 11 mokslinių straipsnių: 1 – leidinyje įtrauktame į Thomson ISI Master Journal List duomenų bazės sąrašą; 2 – tęstiniuose recenzuojamuose mokslo leidiniuose, referuojamuose EBSCO duomenų bazėje; 2 – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose bei 6 – respublikinių konferencijų medžiagose.

Abstract

The thesis deals with the studies on the velocities of the recent vertical movements of the Earth's Crust by applying correlation, regression and multi-criteria analysis of geo-parameters of the territory. The objective of the research involves the regularities of the recent vertical movements of the Earth's Crust, the relationship with the geo-parameters of the territory, models of forecasting for movements and methodology of compiling maps on the vertical movements of the Earth's Crust. The experimental subject matter is the territory of Lithuania.

The major task of the thesis is to work out the method for estimation and modelling of the recent vertical movements of the Earth's Crust measured by applying geodetic methods and to implement the suggested method for compilation of the map of the recent vertical movements of the Earth's Crust within the territory of Lithuania.

In order to achieve the determined target, the following tasks were solved: 1) there were determined the values of the measured recent vertical movements of the Earth's crust from the data of the repeated levelling; 2) there were examined the regularities of the change of the recent vertical movements of the Earth's Crust; 3) there was investigated and determined the relationship of the measured recent vertical movements of the Earth's Crust and geo-parameters of the territory; 4) there were analysed the possibilities of application regressive models for forecasting regarding recent verticals movements of the Earth's Crust and the recommendations were prepared concerning the compiling of maps of the vertical movements of the Earth's Crust; 5) there were estimated regressive models of forecasting of the recent vertical movements of the Earth's Crust by means of multi-criteria method of analysis; 6) there was compiled the map of velocities of the recent vertical movements of the Earth's Crust for the territory of Lithuania with the help of the suggested method.

The regressive models of forecasting and the map of vertical movements of the Earth's Crust compiled with probability not lower than 0,95 are adequate to geodetic measurements, so it is possible to state that the methodology suggested could be adapted for investigation of vertical movements of the Earth's Crust, it could be applied for simulation and compiling of maps.

The work consists of six chapters, introduction and conclusions included. With reference to the topicality of the thesis there were made 15 reports at various conferences in Lithuania and in other countries and there were published 11 scientific articles: 1 article is included into Thomson ISI Master Journal List data base; 2 articles are published in the continued and reviewed scientific publications, referred in EBSCO data base; 2 articles are included into the materials of the international conferences; 6 articles are published in the papers of conferences of the Republic of Lithuania.

Turinys

Reziumė

Abstract

Įvadas 1

Problemos formulavimas 1

Darbo aktualumas 2

Tyrimų objektas 2

Darbo tikslas 2

Darbo uždaviniai 3

Tyrimų metodai 3

Mokslinis darbo naujumas 3

Ginamieji teiginiai 3

Darbo rezultatų aprobavimas 4

Disertacijos struktūra 4

1. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimas geodeziniais metodais ir tyrimo rezultatų interpretavimo ypatumai 5

1.1. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų būklė ir vystymosi tendencijos 5

1.2. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų metodikos 18

1.3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoninio interpretavimo ir žemėlapių sudarymo ypatumai 20

1.4. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo geodeziniais metodais Lietuvos teritorijoje galimybės 22

1.5. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas 26

2. Tyrimų metodika 28

2.1. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių nustatymas pagal kartotinių niveliacijų rezultatus 28

2.2. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajų nustatymas 33

2.3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinių modelių sudarymas 34

2.4. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių savybių kaitos einant laikui nustatymas 35

2.5. Daugiakriterinės analizės metodų taikymas išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoniniam interpretavimui 36

2.6. Antrojo skyriaus išvados 38

3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai šiaurės rytų Lietuvoje 39

3.1. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesiai ir jų kaitos einant laikui tyrimas 39

3.2. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių sąsajos su teritorijos georodikliais tyrimas 46

3.3. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai modeliai ir jų taikymo Žemės plutos judesių žemėlapiams sudaryti tyrimai 52

3.4. Trečiojo skyriaus išvados 60

4. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje žemėlapio sudarymas taikant regresinius modelius 61

4.1. Išmatuoti Žemės plutos judesiai ir jų savybių kaitos kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose tyrimas 62

4.2. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajų kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose analizė 70

4.3. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai modeliai kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose 81

4.4. Regresinių modelių daugiakriterinė analizė 90

4.5. Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio sudarymas 93

4.6. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapio atitikties geodezinių matavimų rezultatams tyrimas ir geotektoninis vertinimas 99

4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados 104

Bendrosios išvados 105

Literatūros sąrašas 107

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas 124

Priedai 129

A priedas. Išmatuoti ir suglotninti tiesiniu ir antrosios eilės daugianariu regresiniu modeliu vertikalieji Žemės plutos judesiai 128

B priedas. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinių modelių grafikai kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose 163

Įvadas

Problemos formulavimas

Dabartinių Žemės plutos judesių skaitmeniniams rodikliams nustatyti atliekami kartotiniai geodeziniai matavimai. Matavimo ženklai įtvirtinami viršutiniuose Žemės plutos sluoksniuose. Todėl regionuose, kuriuose yra stora Žemės nuosėdinė danga, matavimais nustatytos Žemės plutos judesių reikšmės yra tektoninių judesių ir įvairių priežasčių sukeltų lokalių nuosėdinės dangos sluoksnių deformacijų suminis rezultatas. Nuosėdinės dangos deformacijos veikia kaip trikdžiai, iškreipiantieji bendruosius dabartinių tektoninių Žemės plutos judesių dėsningumus. Vertikaliems Žemės plutos judesiams tirti naudojami kartotinių niveliacijų duomenys. Niveliacijų linijos teritorijoje išsidėsčiusios dideliais atstumais, todėl iškyla sunkumų nustatant Žemės plutos judesius kartotinių niveliacijų linijomis apribotų poligonų viduje. Dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ilgus geologinius periodus trunkančio tektoninio proceso šiuolaikinis etapas. Tad žinant, kad nuosėdinei dangai formuotis įtakos turėjo tektoninio vystymosi procesai, nustačius jų ir geodezinių matavimų duomenų sąsajas, atsirastų galimybė sudaryti apibendrintus dabartinių Žemės plutos judesių modelius. Šiuos modelius būtų galima taikyti judesiams prognozuoti ir vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiams sudaryti. Lietuvos teritorijoje yra kokybiški kartotinių niveliacijų tinklas ir georodiklių duomenys. Todėl ši teritorija gali būti tinkamas poligonas geodeziniais matavimais nustatytų

dabartinių Žemės plutos judesių tyrimo ir modeliavimo metodikai tobulinti ir taikymo galimybėms nagrinėti.

Darbo aktualumas

Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimas yra svarbi ne tik mokslinė, bet ir praktinė problema, kuri domina ne vienos mokslo srities ir krypties mokslininkus. Dabartinių Žemės plutos judesių tyrimų duomenys naudojami tektoniniam Žemės aktyvumui tirti, seismiškai aktyvioms teritorijoms nustatyti ir jų pavojingumo laipsniui įvertinti, dabartinių geodinaminių įtampų laukų charakteristikoms nustatyti, naudingųjų iškasenų paieškai, sudėtingų deformacijoms jautrių didesnio ekologinio pavojingumo objektų eksploatacijos rizikai prognozuoti.

Pagrindinis būdas skaitmeniniams dabartinių Žemės plutos judesių rodikliams įvertinti yra geodeziniai matavimai. Todėl nuolat tobulinamos tyrimo metodikos, kaupiami ir sisteminami duomenys, sudaromi matavimais pagrįsti Žemės plutos judesių modeliai. Šiuo metu geodeziniai matavimai jau yra šaltinis, teikiantis informacijos apie dabartinius Žemės plutos judesius. O ir geodezijai reikalingi patikimi dabar vykstančių geodinaminių procesų duomenys. Ši informacija reikalinga kinematiniams ir dinaminiams geodezijos uždaviniams spręsti, redukuojant matavimus į vieną laiko momentą, sudarant ir eksploatuojant geodezinius tinklus. Čia gaunamas abipusis ryšys tarp tiriamojo proceso ir geodeziniais matavimais pagrįstų tyrimo metodų, kuris leidžia ne tik patikimiau nustatyti Žemės plutos judesius, bet ir gerinti geodezinių matavimų kokybę. Tačiau tam reikalingi patikimi Žemės plutos judesių prognozės metodai. Iki šiol atliekant tyrimus pagrindinis dėmesys buvo skiriamas Žemės plutos judesių reikšmėms per tam tikrą laikotarpį nustatyti, bet mažai ištirtos prognozavimo modelių sudarymo ir taikymo galimybės.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių dėsningumai, sąsajos su teritorijos georodikliais, judesių prognozavimo modeliai ir vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio sudarymo metodika. Eksperimentinis objektas – Lietuvos teritorija.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – parengti geodeziniais metodais išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių modeliavimo bei vertinimo metodiką ir, ją taikant, sudaryti Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Remiantis kartotinių niveliacijų duomenimis, nustatyti išmatuotų dabartinių Žemės plutos judesių reikšmes.
2. Ištirti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaitos dėsningumus.
3. Ištirti ir nustatyti išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajas.
4. Išnagrinėti regresinių modelių taikymo dabartiniams vertikaliesiems Žemės plutos judesiams prognozuoti galimybes ir parengti rekomendacijas juos taikyti sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapius.
5. Įvertinti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinius prognozavimo modelius taikant daugiakriterinės analizės metodiką.
6. Sudaryti Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį.

Tyrimų metodai

Geodeziniai matavimai, geodezinių matavimų ir teritorijos georodiklių koreliacinė ir regresinė analizė, daugiakriterinė analizė.

Mokslinis darbo naujumas

Disertaciniame darbe gauti šie nauji rezultatai:

- remiantis matematiniais statistiniais rodikliais, įrodyta vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaita einant laikui;
- parengta metodika dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniams modeliams sudaryti, įvertinant geodezinių matavimų duomenis ir teritorijos georodiklius;
- taikant pasiūlytą metodiką sudarytas Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis.

Ginamieji teiginiai

1. Žemės plutos judesių savybių kaitos einant laikui įrodymas.
2. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai modeliai.

3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapių sudarymo metodika, atsižvelgiant į teritorijos georodiklius.
4. Naujas Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai buvo paskelbti 15 mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje. Disertacijos tematika yra išspausdinta 11 mokslinių publikacijų: du – straipsniai publikuoti tarptautinių konferencijų leidiniuose (Thomson ISI Proceedings) [1A], [2A]; vienas – moksliniame žurnale (Thomson ISI Master Journal List) [3A]; du –tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose žurnaluose [4A, 5A], keturi – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose [6A, 7A, 8A, 9A], du – respublikinės konferencijos medžiagoje [10A, 11A].

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šiose mokslinėse konferencijose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijose *„Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“* 2005, 2006 ir 2007 m. Vilniuje;
- Respublikinėse mokslo konferencijose *„Civilinė inžinerija ir geodezija“* 2004, 2005, 2006, 2007 ir 2008 m. Vilniuje;
- Respublikinėse mokslinėse – praktinėse konferencijose *„Matavimų inžinerija ir GIS“* 2006 ir 2007 m. Kaune;
- Tarptautinėse konferencijose *„Environmental Engineering“*, 2005 ir 2008 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje mokslinėje metodinėje konferencijoje *„Baltic Surveying – 2007“* 2007 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Glaciotectonic structures, palaeobasins and neotectonic setting“ 2007 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje *„Modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields‘‘* 2005 m. Bulgarijoje (Sofijoje).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro šeši skyriai, iš kurių pirmasis yra įvadas, o paskutinis – rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis yra 127 puslapių, neskaitant priedų. Tekste yra 87 numeruotos formulės, 64 paveikslai ir 20 lentelių. Rašant disertaciją buvo naudotasi 182 literatūros šaltiniais.

1

Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimas geodeziniais metodais ir tyrimo rezultatų interpretavimo ypatumai

Skyriuje apžvelgiama dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų būklė ir plėtros tendencijos, dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoninio interpretavimo bei žemėlapių sudarymo ypatumai. Nagrinėjamos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo geodeziniais metodais galimybės.

1.1. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų būklė ir vystymosi tendencijos

Pirmosios žinios apie vertikalius Žemės plutos judesius buvo gautos Baltijos jūros pakrantėse 17–18 a. Tuo metu duomenų apie vertikalius Žemės plutos pokyčius neseism· inėse zonose buvo labai mažai, todėl Šiaurinė Europos dalis (Fenoskandija) buvo pačiame dėmesio centre. 1731 m. Švedijos mokslų akademija įrengė pirmąjį pasaulyje vandens matavimo postą. 1820–1821 m. atlikti kartotiniai stebėjimai leido daryti išvadą, kad Fenoskandijoje kyla Žemės pluta. 1825 m. Švedijoje, 1852 m. Suomijoje buvo įsteigtos vandens lygio stebėjimo stotys (Nikonov 1979).

19 a. pabaigoje – 20 a. pradžioje Baltijos jūros regione vertikaliuosius Žemės plutos judesius mareografiniais metodais nagrinėjo R. Sieger, E. Blomqvist, H. Renqvist, R. Witting, F. Bergsten (Sieger 1893; Blomqvist, Renqvist 1914; Witting 1918; Witting 1922; Bergsten 1930). Kiek vėliau buvo publikuoti R. Wittingo, B. Gutenbergo, J. Bikio, P. Model, O. Jakubovskio darbai (Witting 1922; Gutenberg 1941; Bikis 1940; Model 1950; Jakubovskis 1965).

Pabaltijyje ir Lietuvos teritorijoje vertikaliuosius Žemės plutos judesius geodeziniais metodais tyrė G. Zhelnin, V. Vallner, H. Sildvee, A. Torim, ir kt. autoriai (Zhelnin 1960; 1973; Zhelnin *et al.* 1975; Vallner *et al.* 1975). Geologiniais metodais tyrė V. Gudelis, A. Basalykas, M. Beconis, A. Šliaupa, J. Meščiariakovas ir kt. autoriai (Gudelis 1955a; 1957; Basalykas 1958; Beconis 1960; Šliaupa 1972; Meščiariakovas 1965). 1950–1960 m. detaliai tyrinėjamos Baltijos kranto linijos. Aktyvūs neotektonikos tyrinėtojai buvo V. Gudelis, K. Orviku ir kt. (Gudelis 1955b; 1957; Orviku 1960).

Lietuvos teritorijoje vertikalieji Žemės plutos judesiai sistemingai pradėti tirti nuo 1955 m. Vertikaliesiems Žemės plutos judesiams tirti pirmuosius bandymus, naudojant tiksliąsias niveliacijas, atliko V. Gudelis (Gudelis 1955b). Kiek vėliau vertikaliuosius Žemės plutos judesius pagal kartotines niveliacijas tyrė I. Liesis (Liesis 1960; 1961; 1962; 1963). Bendri tyrimų trūkumai iš dalies susiję su niveliavimo duomenų naudojimu. Niveliacijos buvo vykdomos skirtingu laiku, kartotos nevienodais laiko tarpais, taikyti skirtingo tikslumo instrumentai (Liesis 1962).

Nuolat tobulinant matavimų technologijas ir geodezinius matavimų matematinio apdorojimo metodus, geodeziniai matavimai tapo ne tik pradinės informacijos šaltiniu apie dabartinius Žemės plutos judesius, bet ir geodezijai reikalingais patikimais dabar vykstančių geodinaminių procesų duomenimis (Zakarevičius 2003a). Geodeziniai matavimai yra pagrindinis būdas įvertinti skaitmeninius Žemės plutos judesių rodiklius. Vienas iš pagrindinių metodų – kartotiniai geodezinių tinklų matavimai. Šie matavimai atliekami visose pasaulio valstybėse.

Lietuvoje Žemės plutos judesių tyrimų aktualumas padidėjo ir dėl veikiančios Ignalinos AE. 1988 m. buvo sudaryta TSRS Vyriausybinė komisija Ignalinos AE trečiojo bloko statybų galimybėms tirti. Komisijai konstatavus, kad elektrinės rajone nepakanka tyrimų, tarp jų ir geodezinių, 1989 metais buvo įrengtas geodinaminio monitoringo poligonas apie Drūkšių ežerą. Ignalinos AE geodinaminį poligoną sudaro precizinės niveliacijos tinklas, kurio plotas – 110 km^2. Didžioji tinklo dalis yra Lietuvos teritorijoje, išskyrus rytinės dalies pakraštį, kuris pereina į Baltarusiją. Niveliacijos tinklą sudaro 114 reperių. Tyrimų metodika ir rezultatai aptarti A. Zakarevičiaus, S. Kazakevičiaus, J. Stepanovienės, J. Česnauskienės, R. Ramanausko, S. Šliaupos, A. Stanionio ir kt. autorių darbuose (Zakarevičius, Ramanauskas 1985; Kazakevičius, Stepanovienė 1993; Česnauskienė 2002; Zakarevičius 1994b; Šliaupa, S. *et al.* 2006).

Iki 20 a. paskutinio dešimtmečio pradžios pagrindinis dėmesys Žemės plutos judesių tyrimams pasaulyje buvo skiriamas seismiškai aktyviose teritorijose. Rytų Pabaltyje, taip pat ir Lietuvoje, nebuvo atlikta išsamesnių studijų. Tokia padėtis susidarė todėl, kad egzistavo neigiamas seisminiu atžvilgiu požiūris į platformines sritis. Buvo manoma, kad jose yra aseisminės (iki 3 balų pagal 12 balų skalę) sąlygos ir negali vykti žymesnių Žemės drebėjimų. Buvo manoma, kad mažo seismingumo platforminiuose regionuose geodinaminiai tyrimai turi tik mokslinę reikšmę ir mažai aktualūs praktiškai. Tačiau, kaupiantis seisminių reikšmių instrumentiniams stebėjimų duomenims, kito pažiūra į platforminių sričių seismingumą ir tokių tyrimų taikomąjį pobūdį. Tai tikslinga susieti su 1976 m. spalio 25 d. Osmusarės Žemės drebėjimu. Jo epicentras buvo apie 20 km į vakarus nuo Estijos pakrantės, Osmusarės saloje, Suomių įlankos dugne. Šio Žemės drebėjimo intensyvumas siekė 6–7 balus (pagal 12 balų skalę). 1977 m. kovo 4 d. Lietuvos teritoriją pasiekė žemės drebėjimo, įvykusio Rumunijoje, atgarsiai. Jo intensyvumas Lietuvos teritorijoje siekė apie 4 balus. Žemės drebėjimo bangos sukėlė vietinį rezonansinį epicentrą, kurį kerta submeridinalus tektoninis lūžis (netoli Kėdainių miesto) (Ilginytė, Suveizdis 1994). Jo intensyvumas pietiniuose Baltarusijos rajonuose siekė 5 balus, Estijos šiaurinėje dalyje apie – 3 balus (Boborykin 1988). 1978, 1983, 1985 m. vyko Žemės drebėjimai Baltarusijoje – intensyvumas siekė 4–5 balus. 2004 m. Kaliningrado srityje, Laduškino vietovėje, užfiksuotas 4,4 balo Žemės drebėjimas, kurio židinys buvo 10 km gylyje. Antrasis smūgis įvyko Primorsko mieste ir buvo 5 balų stiprumo. Užfiksuotas ir trečiasis, gerokai silpnesnis, seisminis smūgis. Preliminariais duomenimis, Žemės drebėjimas sukėlė 6 balų Žemės paviršiaus virpesius seisminių įvykių epicentruose Kaliningrade. Šie virpesiai buvo juntami ir didelėje Lietuvos teritorijos dalyje. Klaipėdoje grunto virpesių intensyvumas siekė 5 balus, o Kaune ir Vilniuje – apie 3 (Šliaupa, S. 2005c; Nikonov, Enman 2007). Po šių įvykių Pabaltijo teritorijos jau negalima laikyti aseismiška.

Seisminiu rajonavimu pradėta rimčiau domėtis po 1976 m. Osmusarės žemės drebėjimo Estijoje. 1980 m. aktyviai pradėti plėtoti instrumentiniai seisminiai tyrimai Baltarusijoje, taip pat ir Lietuvoje. Lietuvos teritorijos seismotektoninio aktyvumo tyrimai išnagrinėti V. Ilginytės darbuose.

Pirmieji vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai pagal vandens lygio stebėjimus buvo sudaryti Baltijos jūros regionui 19 a. pabaigoje – 20 a. pradžioje. Vieni iš pirmųjų savo darbus publikavo J. Bikis, R. Wittingas, F. Model, O. Jokubovskis.

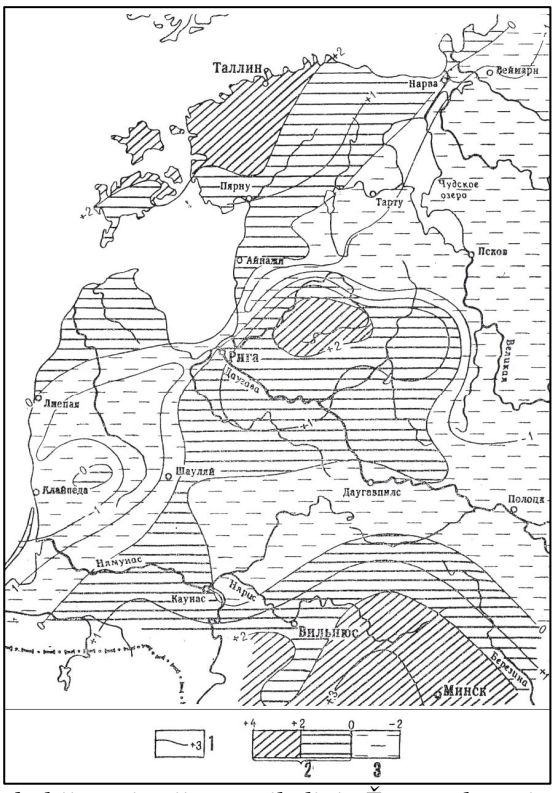
Sudaryti J. Bikio (1940), R. Wittingo (1943), F. Model (1950) ir O. Jokubovskio (1965) vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai naudojantis mareografiniais duomenimis labai nesutampa, tačiau bendras vertikaliųjų Žemės plutos judesių pobūdis Baltijos jūros regione panašus. Rezultatai gali nesutapti ne tik dėl skirtingos matavimų medžiagos, bet ir dėl skirtingos matavimo rezultatų apdorojimo metodikos. Tinkamiausia Pabaltijo regionui rezultatų apdorojimo

metodika taikyta O. Jokubovskio. Jis tyrimams naudojo ilgiausią stebėjimų laikotarpį ir įvertino meteorologinius veiksnius, darančius įtaką mareografiniams punktams. J. Bikio 1940 m. duomenimis, Baltijos jūros regione vertikalieji Žemės plutos judesiai kinta nuo –2 iki 12 mm/metus (ties Klaipėda 1 mm/metus), pagal R. Wittingo 1943 m. duomenis vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių amplitudė siekia 12 mm/metus (ties Klaipėda –1,0 mm/metus). Pagal 1965 m. O. Jokubovskio sudarytą kartoschemą centrinėje Baltijos jūros dalyje vertikalieji Žemės plutos judesių greičiai kinta nuo –1,0 mm/metus iki 6 mm/metus. Minėtų autorių parengti žemėlapiai yra smarkiai generalizuoti. Izolinijos Baltijos jūros regionui buvo išbrėžtos pagal jūros pakraščiuose išdėstytus mareografus, todėl šių kartoschemų patikimumas yra nedidelis.

1940 m. pabaigoje – 1950 m. pradžioje buvo publikuoti pirmieji vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai pagal kartotinių niveliacijų duomenis. Tarp jų – Apšerono pusiasalio, remtasi 1910–1912 m. ir 1928 m. niveliavimo duomenimis (Bregman 1947), Suomijos teritorijos (Kaariainen 1953), Niderlandų teritorijai (Edelman 1954), Japonijos teritorijos matavimų periodas – 1900–1928 m. (Miyabe 1952; Nakano 1954), kiek vėliau Tarybų Sąjungos europinės dalies žemėlapis (Труды ЦНИИГАиК 1958; Meščeriakovas 1958), patikslintas Tarybų Sąjungos europinės dalies žemėlapis (Matckova 1963), Rumunijai (Constantinescu 1966), Didžiosios Britanijos matavimų periodas – nuo 1912–1921 m. iki 1952–1956 m. (Edge 1957), Vakarinės Baškirijos dalies (Rožděstvienski, Žiurenko 1961), Česapyko įlankos teritorijos (Jungtinės Amerikos Valstijos) (Meade 1961), Vokietijos Demokratinėje Respublikoje (Thurm 1971) bei Rytų Europos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (Bulanžė, Lilienberg 1973). 1971 m. sudarytas bei 1973 m. ir 1986 m. papildyti Rytų Europos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai buvo vienas iš didžiausių darbų, apimantis didelę teritorijos dalį. Juos sudarant dalyvavo aštuonių Europos šalių mokslininkai.

Buvo sudaryti devyni Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai, neskaitant atskiriems regionams sudarytų žemėlapių. Pirmasis europinės Tarybų Sąjungos dalies, taip pat ir Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis buvo sudarytas 1958 m. (Труды ЦНИИГАиК 1958). 1960 m. detalesni žemėlapiai buvo sudaryti šiaurinei (Zhelnin 1960) bei pietinei (Liesis 1960) Pabaltijo teritorijai. Patikslintas europinės TSRS teritorijos žemėlapis buvo parengtas 1963 m. (Mackova 1963). Per kitus penkerius metus buvo atlikti kartotiniai matavimai bei sudaryti trys nauji žemėlapiai. 1968 m. buvo parengtas pirmasis Pabaltijo teritorijos žemėlapis (Randjarv 1968), 1971, 1973 m. – Rytinės Europos dalies ir 1973 m. – antrasis Pabaltijo teritorijos žemėlapis (Randjarv 1975).

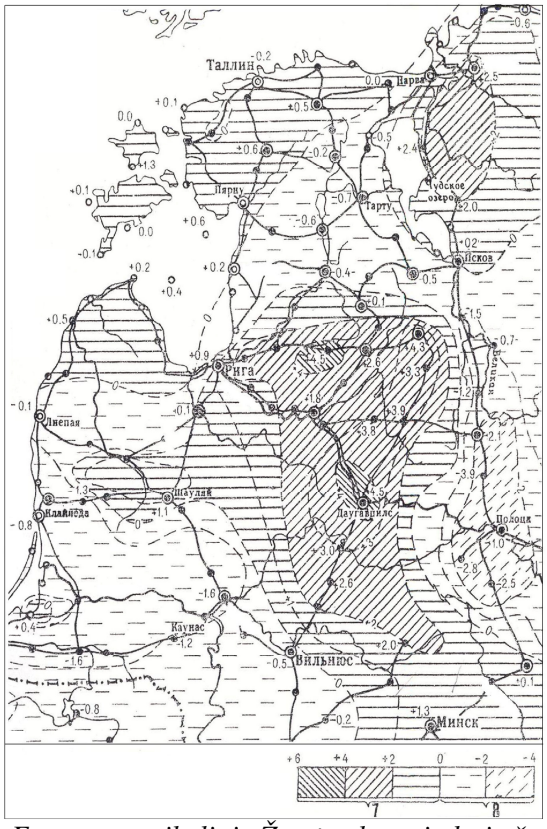
Pagal tuo metu vykdomą Pabaltijo geodezinės komisijos programą (БГК) 1929–1940 m. atlikta aukšto tikslumo niveliacija visoje Pabaltijo teritorijoje. 1968 m. žemėlapio pagrindą (1.1 pav.) sudarė kartotinės niveliacijos iki 1966 m.



1.1 pav. *Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (J. Randjarvas, 1968)*

Pradiniai taškai (1.1 pav.), nustatant vertikaliųjų judesių greitį, apskaičiuoti pagal O. Jakubovskio 1889–1960 m. laikotarpiu atliktų stebėjimų duomenis (Jakubovskis 1966). Kartotinės niveliacijos tinklas buvo sudarytas iš 14 poligonų. Izolinijos išbraižytos kas 0,5 mm/m. Šiame žemėlapyje išsiskiria trys Žemės plutos kilimo zonos: Estijos–Kurzemės – iki 2,2 mm/metus, centrinė Latvijos dalis – iki 2,2 mm/metus, Baltarusijos–Lietuvos kilimo zona, kurios greitis siekia iki 3,5 mm/metus. Žemės plutos grimzdimo zonos: Lenkijos–Lietuvos, rytinė Lietuvos dalis, Estijos–Latvijos dalis šalia Pskovo.

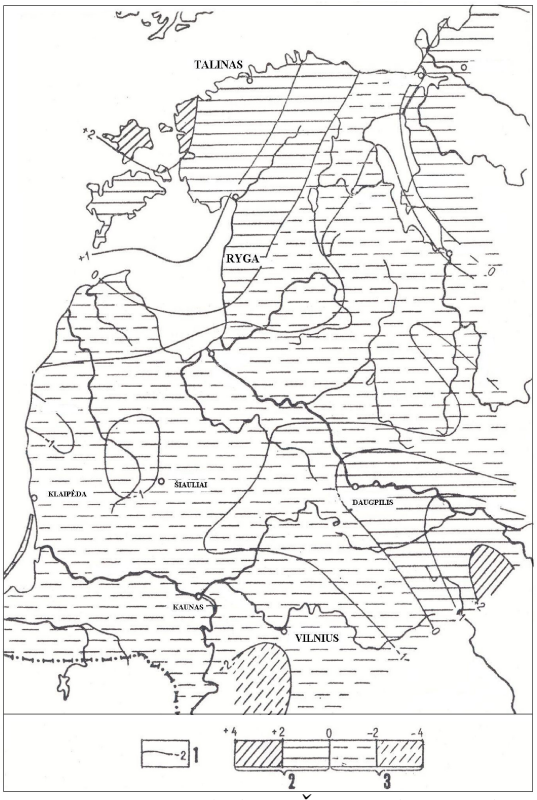
1971 m. Rytų Europos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiui sudaryti buvo naudojami J. Randjarvo duomenys. Jie papildyti 1968 m. atliktos niveliacijos duomenimis (1.2 pav.).



1.2 pav. *Rytų Europos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis, 1973*

Išlyginant greičių tinklą, nustatytos pradinių taškų reikšmės iš penkių mareografų pagal S. Pobedonoscevo metodiką (Pobedonoscev 1973). Metinių Pabaltijo teritorijos greičių tinklas buvo sudarytas iš 15 poligonų, izolinijos išbraižytos kas 2 mm/metus, charakteringose teritorijose – kas 1 mm/metus. Išbraižant greičių izolinijas, didelį svorį įgavo greičiai, nustatyti 38 punktams Baltijos jūros krantuose ir 5 Čiudo ežero punktams okeanografiniu metodu.

1973 m. vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiui (1.3 pav.) sudaryti J. Randjarvas naudojo 1970 m. atliktą pirmosios klasės niveliaciją linijoje Vilnius–Ryga–Talinas–Lomonosov. Absoliutinės greičių reikšmės buvo nustatytos 1889–1970 m. laikotarpiui iš 5 mareografų pagal O. Jakubovskio metodiką (Jakubovskis 1973).



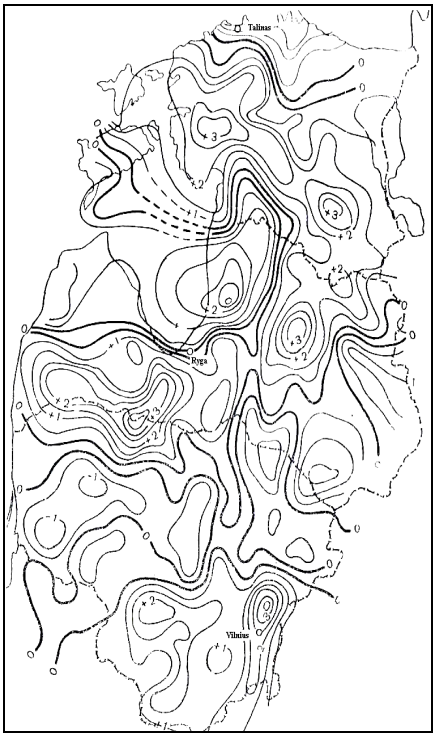
1.3 pav. *Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (J. Randjarvas, 1973)*

Pagal J. Randjarvo sudarytą 1968 m. (1.1 pav.) žemėlapį pietinėje Lietuvos dalyje greičiai siekia iki 3,5 mm/m. Nagrinėjant 1971, 1973 m. (1.2–1.3 pav.) žemėlapius šioje teritorijoje pastebimas nusileidimas ties Vilniumi –1,6 mm/metus, o ties Baranovičiais siekia iki –1,3 mm/metus.

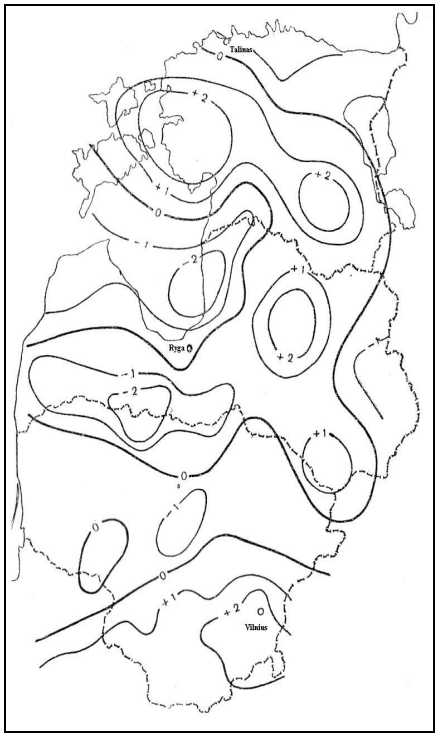
Kiekvienas iš nagrinėjamų žemėlapių buvo sudarytas pradiniu tašku, imant greičių reikšmes nuo Suomių įlankos, Rygos įlankos ir Kuršių marių mareografinių punktų. Būtina pabrėžti, kad šiems žemėlapiams sudaryti buvo naudojami skirtingų autorių mareografiniai duomenys. 1968 m. žemėlapiui sudaryti buvo naudojami O. Jakubovskio 1966 m. (Jakubovskis 1966) duomenys, apimantys 1889–1960 m. matavimo periodą. 1971 m. žemėlapiui taikyta S. Pabedanoscevo metodika (matavimų periodas – nuo 1889 m. iki 1967) (Pabedanoscevo 1973), 1973 m. žemėlapiui taikyti vėlesni O. Jakubovskio duomenys (Jakubovskis 1973), apimantys matavimų periodą iki 1970 m. O. Jakubovskis analizavo ilgesnės trukmės mareografinius stebėjimus, o S. Pabedanoscevas taikė kitą metodiką, leidžiančią nagrinėti trumpo periodo stebėjimus. Esminis skirtumas tarp metodų buvo meteorologinių faktorių

įvertinimas, darantis įtaką vidutiniam jūros lygiui. O. Jakubovskis įskaito šią pataisą, tačiau S. Pabedanoscevas manė, kad metinių reikšmių vidurkiai šią įtaką kompensuoja. Abiejų autorių absoliučių greičių reikšmių tikslumas siekė ±0,3–0,4 mm/metus. Skirtumai tarp O. Jakubovkio ir S. Pabedanoscevo gautų rezultatų siekia iki ±0,4–0,6 mm/metus, išskyrus vakarinės pakrantės dalį bei Estijos salas, kur siekia nuo 0,7 iki 2,4 mm/metus.

A. Ražinskas sudarė Pabaltijo teritorijai geopotencialinio lauko žemėlapį (1.4 pav.). Šiame žemėlapyje atvaizduotos sunkio anomalijos, eliminavus išcentrinės jėgos įtaką. 1975 m., remiantis šiais duomenimis, paskelbė vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį (1.5 pav.). Palyginę šiuos žemėlapius, matome, kad nulinės vertikaliųjų greičių izolinijos maždaug sutampa su nulinėmis geopotencialinio lauko izolinijomis. Nedidelis grimzdimas pastebimas vidurio Lietuvos teritorijoje, o pietinėje Lietuvos dalyje – kilimas.

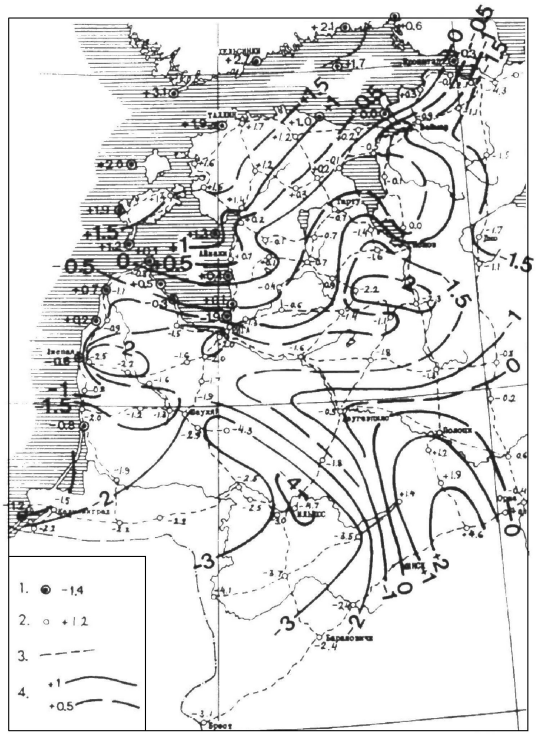


1.4 pav. *Pabaltijo teritorijos geopotencialiojo lauko žemėlapis (A. Ražinskas, 1975)*



1.5 pav. *Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis(A. Ražinskas, 1975)*

1993 m. buvo paskelbtas papildytas 1973 m. sudaryto vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio variantas (1.6 pav.) (Randjarvas 1993).

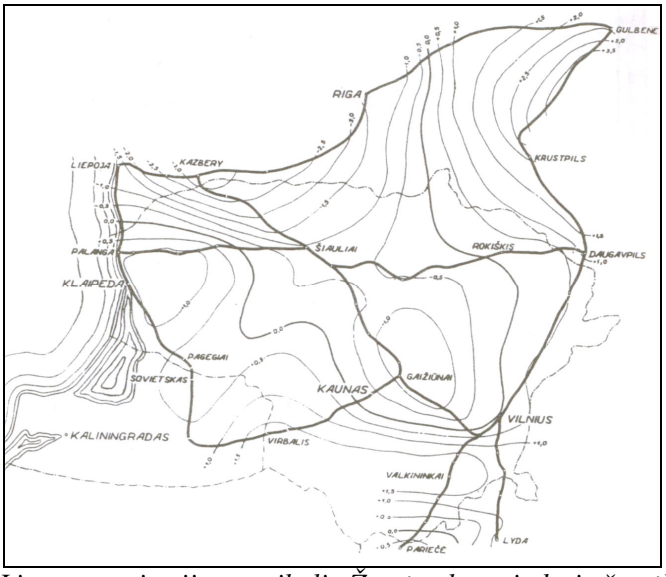


1.6 pav. *Pabaltijo teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (J. Randjarvas, 1993)*

Pagal šį žemėlapį Lietuvos teritorija yra bendro Žemės plutos grimzdimo zonoje, išskyrus mažesnio intensyvumo grimzdimą (0,5–1,5 mm/metus) Ventos aukštupio zonoje, Kazlų Rūdos, Dotnuvos lokaliniuose arealuose.

Žemės plutos judesiams tirti Lietuvos teritorijoje I. Liesis naudojo carinės Rusijos, vokiečių, tarpukario Lietuvos ir Latvijos, Lenkijos niveliacijas, atliktas Vilniaus krašte, bei tarybiniu laikotarpiu atliktas niveliacijas (Liesis 1963). Autorius, remdamasis minėtų niveliacijų atlikta analize, sudarė vertikaliųjų Žemės plutos judesių grafikus, sąlygiškai laikydamas, kad laikotarpiu tarp dviejų niveliacijų nėra pajudėję niveliacijos ženklai, o niveliacijos duomenys nėra paveikti sisteminių ir neleistino dydžio klaidų. Naudojantis metinių greičių grafikais, buvo sudaryti du niveliacijos poligonai. Pirmąjį sudarė kartotinio niveliavimo ėjimai: Liepoja–Šiauliai–Kaunas–Virbalis–Sovetskas–Klaipėda–Liepoja. Šio uždaro poligono perimetras lygus 727,7 km. Antrasis poligonas buvo sudarytas iš šių ėjimų: Kazbari–Ryga–Gulbenė–Dūkštas–Vilnius–Gaižiūnai, kurio perimetras lygus 771,2 km. Poligonų išlyginimas atliktas grafiniu būdu. Tam tikslui kiekviename metinių greičių grafike buvo išvestos ištisinės linijos taip, kad plotai virš ir žemiau tų linijų, t. y. teigiami ir neigiami

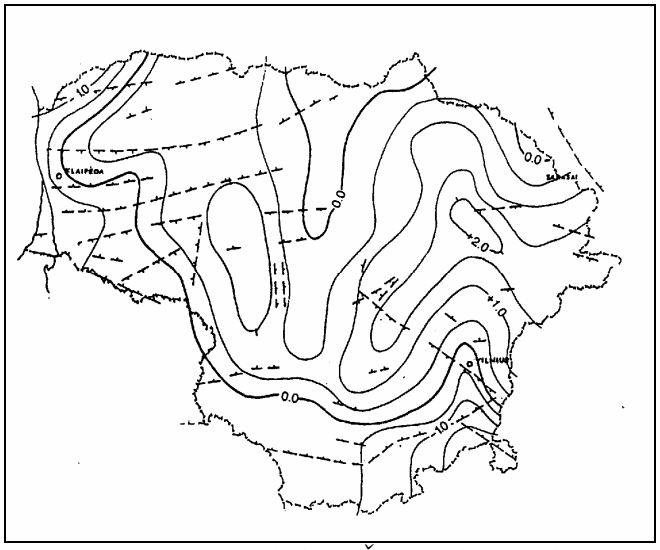
plotai, būtų vienodi. Toks plotų lygybės reikalavimas buvo išlaikytas tik tais atvejais, kai grafikuose nepasitaikė staigių nukrypimų nuo bendros ženklų išsidėstymo krypties. Du minėti poligonai buvo uždaryti grafiniu būdu, pagal grafikuose išvestas metinių greičių ištisines linijas. Kadangi laikotarpis tarp dviejų niveliacijų įvairiose linijose buvo nevienodas, tai grafiniam uždarų poligonų išlyginimui buvo įvesti sąlyginiai linijų ilgiai, kaip buvo daryta išlyginant metinius Žemės plutos judesių greičius Tarybų Sąjungos vakarinės dalies rajonuose (Zhelnin 1957). Pradiniu tašku, nustatant vertikalių judesių kryptį ir greitį, pasirinktas Liepojos futštokas (Liesis 1960; 1961; 1962; 1963). Pagal 1960 m. I. Liesio sudarytą žemėlapį (1.7 pav.) Pietrytiniame Pabaltijyje dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai kito nuo –3 iki +3 mm/metus. Mažeikių–Radviliškio kryptimi matyti ryškus metinių neigiamų judesių didėjimas, o apie Kazberi (Latvijos teritorija) ir Lūšę Žemės plutos nusileidimas siekia iki 2 mm/metus. Teigiami Žemės plutos judesiai apima Klaipėdą, Kauną, Virbalį ir Latvijos teritorijos dalį ties Kristpiliu ir Gulbene.



1.7 pav. *Lietuvos teritorijos vertikalių Žemės plutos judesių žemėlapis (I. Liesis, 1960)*

Lyginant gautus vertikaliuosius Žemės plutos judesius Baltijos pajūryje su J. Bikio duomenimis, gautais iš mareografinių Baltijos jūros stebėjimų, matyti, kad jie beveik sutampa. Turima omenyje, kad pats Liepojos taškas pagal J. Bikio duomenis, paskelbtus 1940 m., grimzta kiekvienais metais po 1,3 mm (Bikis 1940). Imant išeities punktu Liepoją su neigiamu 1,3 mm/metus greičiu, Palangoje išeitų nulinis judesys, o Klaipėdoje apie +1 mm/metus. Tai atitinka J. Bikio duomenis (Liesis 1962).

A. Zakarevičius vertikaliųjų Žemės plutos judesių analizei taikė sisteminės analizės metodologiją. Pagrindinį dėmesį skyrė geodeziniais metodais nustatytų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių analizei, jungiant į vieną sistemą, kaip atskirus posistemius, geodezinių matavimų rezultatus bei svarbiausias geologines teritorijos charakteristikas. Siekiant sumažinti tyrinėtojo subjektyvumą, buvo taikomi matematiniai metodai. Tokiais principais atliekant tyrimus, buvo sudarytas vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis. Žemėlapiui sudaryti naudota matematinė statistinė analizė. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių analizei taikyti regresiniai modeliai. Regresiniam modeliui sudaryti buvo panaudotos pagal kartotinių niveliacijų linijose išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmės bei georodikliai (kristalinio pamato reljefas, kvartero dangos storis, pagrindinių sluoksnių reljefas, pagrindinių sluoksnių storis, dabartinis reljefas, gravitacinis laukas, neotektoniniai judesiai). Dabartinių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmės buvo nustatytos kas 25 km grafiškai iš sudarytų pagal kartotinių niveliacijų linijas vertikaliųjų judesių greičių grafikų. Skaitmeninės georodiklių reikšmės tuose pačiuose taškuose nustatytos iš geologinių žemėlapių. Pagal regresinį modelį sudarytas dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis pateiktas 1.8 paveiksle.



1.8 pav. *Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (A. Zakarevičius, 1994)*

1981 m. buvo parengtas jungtinis Karpatų–Balkanų regionui niveliacijos tinklas, kurio ilgis siekė 40 000 km. Jį sudarė 249 centriniai punktai ir 133 poligonai. Šį tinklą sudarė Vengrijos, Jugoslavijos, Rumunijos, TSRS, VDR, Bulgarijos, Čekoslovakijos ir Lenkijos duomenys. Tarp pirmojo ir antrojo jungtinio tinklo išlyginimo praėjo 42 metai. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių

greičių reikšmėms apskaičiuoti buvo naudojami aštuonių mareografų duomenys, esantys Adrijos jūroje, Baltijos jūroje ir Juodojoje jūroje. Mareografinių duomenų tikslumas buvo ±0,1–±1,2 mm/metus, o centrinių punktų ±0,3 – ± 1,4 mm/metus. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis sudarytas masteliu 1:1 000 000. Karpatų–Balkanų regione nustatyti vertikalieji Žemės plutos judesiai siekė nuo –4 mm/metus iki +6 mm/metus (Joo *et al.* 1981).

1981 m. sudaryta darbo grupė publikavo Vakarų Vokietijos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį masteliu 1: 1 000 000 (Malzer 1981).

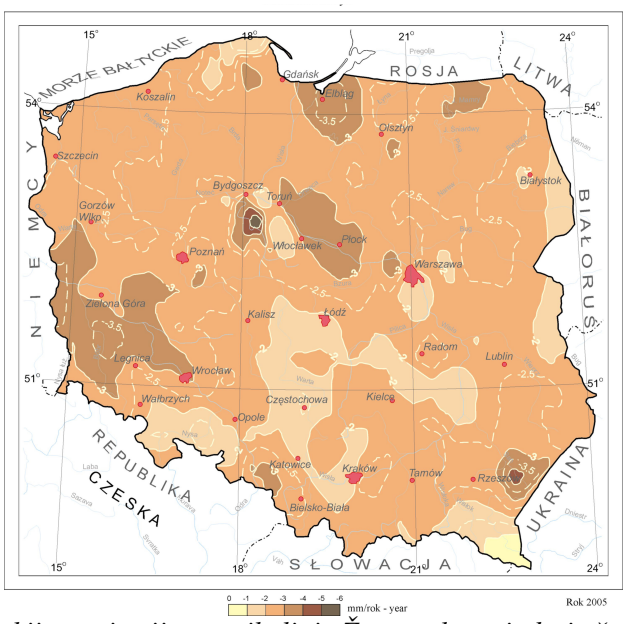
1987 m. buvo sudarytas trečiasis Karpatų–Balkanų regiono vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis. Šiam žemėlapiui sudaryti duomenis pateikė 9 valstybės – Bulgarija, Čekoslovakija, VDR, Vengrija, Lenkija, Rumunija, TSRS, Austrija ir Italija. Šiuos darbus koordinavo Vengrija. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapiui sudaryti panaudoti geodeziniai, geologiniai, geomorfologiniai bei okeanografiniai metodai. Šio jungtinio tinklo pagrindu atlikta vertikaliųjų Žemės plutos judesių analizė ir parengtas žemėlapis (masteliu 1:1000 000) (Joo *et al*. 1988).

Čekoslovakija tarptautiniam tinklui išlyginti naudojo 1947–1962 m. bei 1973–1983 m. atliktų tiksliųjų niveliacijų duomenis. Gauti vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai buvo nuo +1,0 mm/metus iki –4,0 mm/metus. (Vanko *et al.* 1987; Vanko 1988).

Rumunija turėjo atnaujinti vertikaliųjų žemės plutos judesių žemėlapį po 1977 m. kovo 4 d. įvykusio Žemės drebėjimo Vrancea srityje, kurio padariniai buvo juntami ir Lietuvoje (Popescu, Dragoescu, 1987).

Rytinėje Vokietijos teritorijoje vertikaliuosius Žemės plutos judesius nagrinėjo ir vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį sudarė J. Ihde, G. Reichardt ir J. Steinberg.

Jungtiniam tinklui Lenkijos teritorijoje panaudoti 1953–1957 m. ir 1974–1979 m. kartotinio niveliavimo rezultatai. Remdamasis šiais rezultatais T. Wyrzykowski parengė visos Lenkijos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį masteliu 1:2 500 000. 2005 m. K. Kowalczyk paskelbė Lenkijos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį, įtraukdamas 1997–2003 m. kartotinės tiksliosios niveliacijos duomenis (1.9 pav.). Šiam žemėlapiui sudaryti buvo atlikta keturių mareografų Wladyslawowo, Ustka, Kolobrzeg ir Swinoujscie statistinė duomenų analizė. Atlikus mareografinių punktų regresinę analizę, nustatyta, kad tinkamiausias yra Wladyslawowo mareografinis punktas. Gauti rezultatai parodė, kad Lenkijos teritorijoje jokių teigiamų judėjimų nevyksta. Didžiausi neigiami vertikalieji Žemės plutos judesiai nustatyti šalia Inowrocław ir Rzeszów (–5 mm/metus). Šalia Varšuvos vertikalieji Žemės plutos judesiai kinta nuo –1 mm/metus iki –3 mm/metus, pagrindinėje Lenkijos teritorijos dalyje svyruoja nuo –1,5 mm/metus iki –3 mm /metus. Mažiausi neigiami vertikalieji Žemės plutos judesiai buvo nustatyti pietų Bieszczady rajonuose (Karpatai) (Kowalczyk 2005; 2006).



1.9 pav. *Lenkijos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis (K. Kowalczyk, 2005)*

Parengtas Apšerono pusiasalio vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis, remiantis geologine, geofizine duomenų interpretacija (Klebleyev, Martynovski 1988) bei Kanados žemėlapis (Carrera, Vaniček 1988).

Seisminiams ir kompleksiniams geodinaminiams tyrimams atlikti įrengiami geodinaminiai poligonai. Nemažai geodinaminių poligonų buvo įrengta buvusioje Tarybų Sąjungos teritorijoje: Baltarusijoje, Estijoje, Kamčiatkoje, Urale, Kryme, Taškente, Baškirijoje, Karpatuose, Ašchabade, Donbase, Dagestane ir kt. (Filkin 1980; Vereda *et al.* 1980; Bilinskij *et al.* 1980; Deinega *et al.* 1980; Lykov *et al.* 1980). Kamčiatkos pusiasalyje buvo įrengti net aštuoni geodinaminiai poligonai seismiškai aktyvioje zonoje, tinklai apėmė apytiksliai 4000–5000 km^2 teritorijos (Fedotov *et al.* 1988). Šiuo metu pasaulyje yra daugiau kaip 50 geodinaminių poligonų. Rumunijoje įrengtas „Gruiu-Caldamsani“ geodinaminis poligonas Vrancea regione, tai svarbiausia seisminė zona šalyje (Radulescu *et al.* 1993).

Vertikalieji Žemės plutos judesiai plačiai nagrinėjami didesnio tektoninio aktyvumo bei seismingumo zonose. Dažniausiai tektoniniai žemės drebėjimai vyksta neseniai susidariusiose kalnuotose srityse (Alpės, Karpatai, Kaukazas ir kt.) ir ten, kur Žemės plutą yra suskaldę tektoniniai lūžiai ir plyšiai. Pvz.; Surugos įlankoje (Centrinė Japonijos dalis) (Takayama, Yoshida 2003), bei Honšiū saloje Kanto regione (Fujii 1993), Pietinėje Meksikos dalyje Kolimos

ugnikalnis (Murray, Wooller 2002), Italijoje tarp Vulcano ir Lipari salų (vulkaninės kilmės salynas) (Bonaccorso 2002), Ispanijoje Pirėnų pusiasalyje (Gimenez *et al.* 1998; Gimenez *et al.* 2002), Prancūzijoje Pirėnų kalnuose (Rytų Pirėnai ir Vakarų Pirėnai) (Rigo, Cushing 2000), Kamčiatkos pusiasalyje (Fedotov *et al.* 1992), Tadžikistane (Enman, Raizman 1988), Panamoje (Staples 1987), Sachalino saloje (Zakharov 1986), Suomijoje (Verio 1983), Čekijos Respublikos Vakarų Bohemijos regionas yra seismiškai aktyvioje zonoje, stipriausi Žemės drebėjimai (4,5 balo) užfiksuoti 1985–1986 m. laikotarpiu (Mrlina *et al.* 2003). Graikijoje Korinto įlankoje (Stiros *et al.* 2007), Italijoje šalia Apeninų kalnų 1943–2003 m. matavimų periodui apskaičiuoti reliatyvūs vertikalieji greičiai 2,5–3,0 mm/metus (D'Anastasio *et al*. 2006), taip pat ilgalaikiai geodeziniai matavimai atliekami Iwo-jima saloje, Japonijoje (Ishii *et al.* 1981; Ukawa *et al.* 2006).

Pažymėtina, kad literatūros šaltiniuose nagrinėjant dabartinių Žemės plutos judesių tyrimus, pagrindinis dėmesys skiriamas geodeziniams metodams. Nustatant Žemės plutos judesius ir juos geotektoniškai interpretuojant, skiriama per mažai dėmesio teritorijų georodiklių bendram naudojimui su geodeziniais matavimų rezultatais. Nėra bendros metodikos ir rekomendacijų, kaip taikyti geologines teritorijų charakteristikas matavimo duomenims interpretuoti, interpretavimo rezultatus apibūdinant ir nustatant interpretavimo patikimumą objektyviais statistiniais kriterijais. Pirmieji bandymai sudaryti tinkamą metodiką nagrinėti (Zakarevičius, Turij 1988; Zakarevičius 1994a-b; 2003a) darbuose.

1.2. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimų metodikos

Tiriant dabartinius vertikaliuosius Žemės plutos judesius, didelis dėmesys skiriamas niveliavimo tikslumui. Ypač pavojingos yra sisteminės matavimo paklaidos. Sisteminės paklaidos priklauso nuo daugelio priežasčių, susijusių su niveliavimo metodika, naudojamais prietaisais, planetariniais ir vietiniais gamtos reiškiniais, išorinėmis sąlygomis ir kt. Dėl minėtų priežasčių nustatyti atsiradusias sistemines paklaidas bei apibūdinti jų dydį ir įtaką niveliavimo rezultatams yra labai sudėtinga. A. Zakarevičius ir N. Turij pasiūlė metodiką, kurią taikant sumažinamos sisteminių matavimų paklaidos, veikiančios apskaičiuotas vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmes. Teoriniai metodikos principai paremti tiesioginių ir atvirkštinių niveliacijos ėjimų, išmatuotų aukščių skirtumų nesutapimais, ir tiesiniu sisteminių paklaidų kaupimosi modeliu.

Metodikos taikymo efektyvumą A. Zakarevičius ir N. Turij tyrė Baltarusijos geodinaminiame poligone trasoje Borisov–Vileika. Pagal siūlomą sisteminių paklaidų įtakos sumažinimo metodiką vertikaliųjų judesių greičių nustatymas, palyginti su standartiniu matavimų apdorojimu, padidėjo apie 50 %. Siūloma paklaidų sumažinimo metodika buvo tiriama ir modeliavimo būdu. Gauti

modeliavimo rezultatai tik patvirtino metodikos taikymo efektyvumą (Zakarevičius, Turij 1988).

Dabartinius vertikaliuosius Žemės plutos judesius galima nustatyti dviem būdais: pagal atskirų niveliacijų tinklų altitudžių skirtumus arba pagal aukščių skirtumų pasikeitimus tarp atskirų niveliavimo ciklų. Pirmuoju atveju, nustatant vertikaliuosius Žemės paviršiaus judesius, būtina, kad abi niveliacijos būtų apdorotos toje pačioje aukščių ir sunkio sistemoje. Tačiau rezultatams apdoroti naudojamos įvairiu laiku atliktos niveliacijos ir šį būdą pritaikyti praktikoje sudėtinga, o kartais net ir neįmanoma. Poligono aplinka, kurioje atliekami matavimai, gali lemti tam tikrą matavimo rezultatų paklaidų koreliacinę priklausomybę. Ši priklausomybė gali būti net tarp skirtingais metais atliktų matavimų (Zakarevičius 1994a-b). Antrasis metodas turi pranašumų, nes tam tikra dalis minėtos koreliacinės priklausomybės poveikio galutiniams tyrimų rezultatams pašalinama. Kitas dar svarbesnis šios metodikos privalumas yra tas, kad į matavimo rezultatus nereikia įvesti pataisų dėl gravitacinio lauko anomalijų įtakos. Dėl to nereikia išmatuotus aukščių skirtumus redukuoti į normalinę ar kitą geopotencialinę aukščių sistemą. Tokiu būdu eliminuojasi sisteminės paklaidos, atsiradusios dėl išmatuotų dydžių redukavimo į geopotencialines aukščių sistemas, padidėja vertikaliųjų judesių nustatymo tikslumas. Remiantis atliktais eksperimentais nustatyta, kad apdorojant Ignalinos AE geodinaminio poligono matavimus pirmuoju metodu, vieno kilometro atstumu esančių reperių reliatyvių judesių nustatymo vidutinė kvadratinė paklaida yra 0,42 mm, o antruoju atveju gauta 0,34 mm. Tikslumas padidėjo apie 25 % (Zakarevičius 1994a).

Norint įvertinti dabartinius geodinaminius procesus sudarant ir eksploatuojant geodezinius tinklus, prognozuojant teritorijų seisminį pavojingumą bei sprendžiant kitus mokslinius ir praktinius uždavinius, reikia žinoti Žemės plutos judesių savybes ir jų kaitą. Vienas svarbių klausimų – nustatyti, ar judesių intensyvumas bei kryptis einant laikui yra pastovūs ar kinta. Apie Žemės plutos judesių savybių kaitą laikui bėgant yra nemažai duomenų ir hipotezių (Zakarevičius 1994a-b; Zakarevičius 2003a; Randjarv 1993; Zhelnin 1975). Konstatuoti ne tik greičių pokyčiai, bet ir judesių krypties inversijos, tačiau ne visi šie rezultatai pagrįsti matavimais. Dažnai šioms išvadoms pagrįsti nepakakdavo kartotinių matavimų arba būdavo nepakankamas matavimų tikslumas. Prielaidos apie judesių inversiją padarytos remiantis ir dvidešimtojo šimtmečio pradžios niveliacijomis, kurios nebuvo labai tikslios bei nedideliu kartotiniu niveliuotų ženklų skaičiumi. Kad tam tikrose Lietuvos teritorijose pasireiškia Žemės plutos judesių ne tik greičių kaita, bet ir inversijos, nustatyta atliekant tyrimus Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiame poligone (Zakarevičius 1997; Zakarevičius 2003a; Šliaupa, S. *et al*. 2006) bei netoliese esančiame Baltarusijos geodinaminiame poligone (Zakarevičius, Turij 1988). Todėl Žemės plutos judesių savybių kaitą einant laikui, būtina toliau tirti.

1.3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoninio interpretavimo ir žemėlapių sudarymo ypatumai

Išmatuoti dydžiai yra tektoninių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir netektoninės kilmės judesių, sukeltų įvairių gamtinių ir antropogeninių priežasčių, algebrinė suma. Gamtinės priežastys – gruntinių vandenų lygio sezoniniai pokyčiai, gruntų deformacijos, mechaninės bei cheminės erozijos reiškiniai, karstiniai procesai ir kt., taip pat žmogaus ūkinė ir inžinerinė veikla.

Nors platforminiuose rajonuose tektoniniai judesiai yra lėti, greito poveikio geologinių ir geomorfologinių procesų raidai neturi, tačiau per ilgesnius laiko tarpsnius jie šiuos procesus veikia. Iš stebimų kitų geologinių ir geomorfologinių ilgesnio laikotarpio raidos dėsningumų galima spręsti ir apie dabartinių Žemės plutos judesių raidos tendencijas.

Ieškant ryšio tarp šiuolaikinių ir neotektoninių judesių pietrytinėje Pabaltijo teritorijoje prieita išvada, kad šiuolaikiniai judesiai plėtojasi Žemės plutos atskirų tektoninių struktūrų paveldėtų judesių tendencijų fone, mažiausiai nuo poledynmečio periodo pradžios. Netektoniniai judesiai yra Žemės plutos bangos, besiskiriančios gerokai ilgesniu vystymosi periodu ir pastovesniu judesių ženklu. Netektoniniai judesiai yra trumpesnių Žemės plutos osciliacijų (šiuolaikinių judesių suminis rezultatas). Šiuolaikiniai judesiai yra palyginti trumpesnės Žemės pulsacijos. Jos pasireiškia gana apribotame teritorijos plote ir skiriasi permainingu judesių ženklu bei greičiu (Liesis, Gudelis 1961).

Kad būtų užtikrintas tyrimų kompleksiškumas, vertikalieji Žemės plutos judesiai buvo pradėti interpretuoti kaip sudėtinga dinaminė sistema (Zakarevičius 1994a). Nagrinėjant geodezinius matavimus kompleksiškai su teritorijos geologiniais, geomorfologiniais, geofiziniais ypatumais, interpretuojant daugelį požymių kaip sudėtingų tarpusavio sąveikų sistemą, galima taikyti matematiniais metodais pagrįstas sisteminės analizės metodikas. Matavimo rezultatų geotektoninis ir fizinis interpretavimas atliekamas pagal sistemos komponenčių tarpusavio sąveikos ir abipusius ryšius tarp interpretuojamojo geotektoninio modelio ir matavimo rezultatų (Zakarevičius 2003a; Randjarv 1993). Atliekant geotektoninę Žemės plutos judesių geodezinių matavimų interpretaciją reikia naudoti nuosėdinės dangos sluoksnių savybes. Tačiau žinant, kad nuosėdinės dangos sluoksnių ypatybes lemia ne tik tektoniniai judesiai, bet ir kiti geologiniai procesai, tiesioginės funkcinės priklausomybės tarp Žemės plutos judesių ir nuosėdinės dangos sluoksnių geometrinių savybių negali būti. Šis ryšys gali būti nustatomas tik stochastinėmis priklausomybėmis.

Lietuvos geologinė sandara teritoriniu požiūriu yra nevienalytė. Todėl, nustatant sąsajas geodeziniais metodais išmatuotų dabartinių Žemės plutos

judesių su teritorijos georodikliais ir kitus tyrimus, reikia atlikti regioniniu principu. Skirtingą sąsajų pobūdį pavieniuose regionuose patvirtina ir anksčiau Lietuvos teritorijoje atlikti tyrimai (Zhelnin 1975; Šliaupa, S. *et al*. 2006; Zakarevičius 1997).

Kadangi nagrinėjami žemėlapiai apima tą pačią teritoriją ir vaizduoja tą patį fizinį procesą, A. Zakarevičius žemėlapių analizei taikė matematinės statistinės analizės metodus. Šiais metodais galima nustatyti žemėlapių skaitmeninius ryšius ir ištirti, ar matematiniu statistiniu požiūriu jie sudaro bendrą kompleksą bei išsiaiškinti labiausiai atsilenkiančius nuo šio komplekso žemėlapius. Nagrinėjamų Pabaltijo teritorijos žemėlapių (1958 m. žemėlapis; 1963 m. V. Matckovos žemėlapis; 1973 m. J. Randjarvo žemėlapis; 1968 m. J. Randjarvo žemėlapis; Rytų Europos 1973 m. žemėlapis; A. Ražinsko žemėlapis; Geopotencialinio lauko žemėlapis; Neotektoninių judesių žemėlapis; Kristalinio pamato reljefo žemėlapis; Pagrindinių sluoksnių reljefo žemėlapis; Pagrindinių sluoksnių storio žemėlapis) analizė atlikta A. Zakarevičiaus darbuose (Zakarevičius 1972; 1975; 1979; Zakarevičius, Ruzgienė 1980a-b; Zakarevičius, Gudelis 1980). Gauti rezultatai parodė, kad nagrinėjamų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių žemėlapių negalima laikyti sudarančiais bendrą kompleksą. Gana tvirtas vidinės kompleksinės koreliacijos ryšys gautas tik 1958 m., 1963 m., Rytų Europos 1973 m. žemėlapių grupei. 1968 m., 1973 m. J. Randjarvo bei A. Ražinsko žemėlapiai nesudaro bendro komplekso. Taip pat nustatyta, kad 1958 m., 1963 m., Rytų Europos 1973 m. žemėlapių yra kur kas didesni grupinės koreliacijos koeficientai su pagrindinių sluoksnių reljefu.

Nustatytas tvirtas vidinės kompleksinės koreliacijos ryšys tarp 1958 m., 1963 m., Rytų Europos 1973 m. žemėlapių parodė, kad sudarant minėtus žemėlapius, buvo naudojami tie patys metodologiniai principai. Būtina pabrėžti, kad prie šių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapių sudarymo prisidėjo nemaža dalis tų pačių autorių.

Lietuvos teritorijoje, palyginti su kitais Pabaltijo regionais, yra skirtingos geologinės sąlygos. Norėdamas nustatyti vertikaliųjų Žemės plutos judesių atspindį Žemės paviršiuje, A. Zakarevičius atliko Lietuvos teritorijos kompleksinę koreliacinę analizę. Atliekant šią analizę papildomai buvo įtraukti trys žemėlapiai: I. Liesio vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis, kvartero dangos storio žemėlapis ir dabartinio reljefo žemėlapis. Nustatyta, kad Lietuvos teritorijoje dabartiniai vertikalieji Žemės plutos judesiai turi panašius koreliacinius ryšius su geologinėmis charakteristikomis, kaip ir visame Pabaltijo regione. Šį skirtumą galima būtų paaiškinti kaip tektoninių Žemės plutos judesių transformaciją nuosėdinėje dangoje.

1.4. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimo geodeziniais metodais Lietuvos teritorijoje galimybės

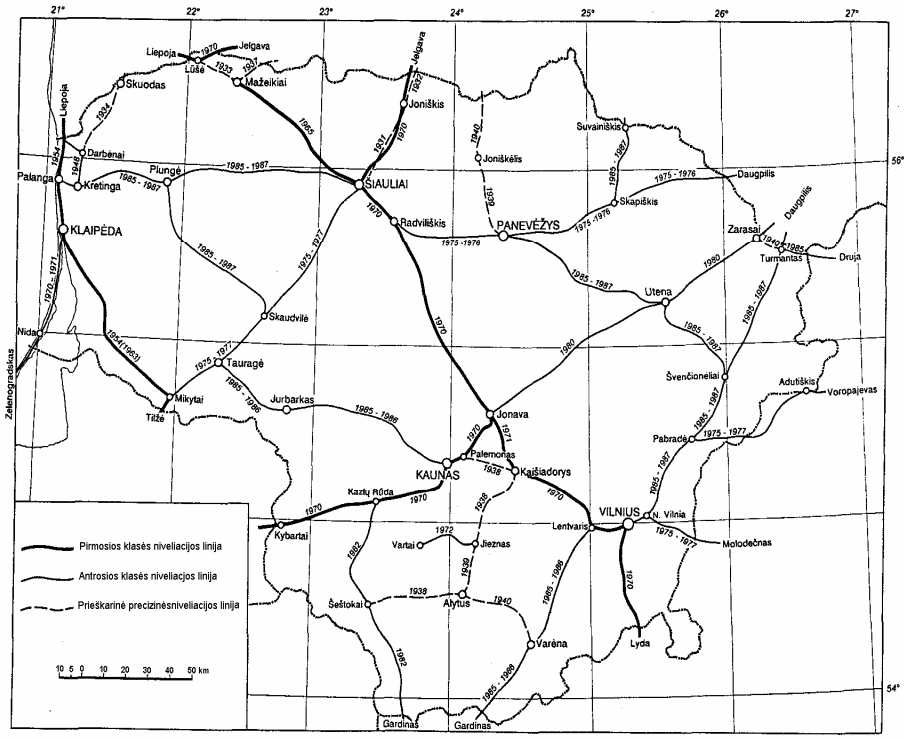
Vertikaliesiems Žemės plutos judesiams nustatyti taikomi kartotinių niveliacijų matavimo duomenys. Todėl išnagrinėsime, kokios niveliacijos Lietuvos teritorijoje atliktos, koks jų tikslumas ir realios galimybės tirti Žemės plutos judesių savybes, jų kaitą einant laikui bei sudaryti naująjį Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį.

Lietuvoje pirmosios niveliacijos linijos buvo nutiestos 19 a. pabaigoje. Šios linijos sudarė fragmentą milžiniško niveliacijos tinklo, įterpto tarp Baltijos ir Juodosios jūros ir apėmusio vakarinę Rusijos imperijos dalį. Lietuvos teritorijai teko aštuonios linijos arba jų dalys, kurių bendras ilgis siekė 731 km (Kazakevičius 1998).

Lietuvos karo topografijos skyriaus precizinė niveliacija buvo pradėta vykdyti 1930 m. ir tęsiama iki 1941 m. Darbus spartino tarptautinis įsipareigojimas, nes 1924 m. Helsinkyje sudaryta Pabaltijo geodezinė komisija nusprendė vykdyti tikslius geodezinius darbus, skirtus mokslo reikalams. Tarp jų buvo ir precizinė niveliacija. Ši aukšto tikslumo niveliacija buvo jungiama su Lietuvos, Latvijos ir Vokietijos niveliacijomis. Lietuvos teritorijoje iki 1941 m. jos buvo atlikta 2051 km (Kriščiūnas 1939).

Baltijos geodezijos komisija tarpukariu organizavo pagrindinius geodezinius darbus Baltijos jūrą supančiose šalyse, tarp jų ir Lietuvoje. Komisijos pastangomis atliekant matavimus buvo laikomasi vienodos metodikos ir tikslumo normų, taikomi naujausi mokslo ir technikos laimėjimai. Baltijos geodezijos komisijos veiklą nutraukė Antrasis pasaulinis karas (Kazakevičius, Būga 2004).

Dėl prasidėjusios sovietų okupacijos pirmasis precizinės niveliacijos tinklas, sudarytas tarpukario metais, taip ir liko neužbaigtas. Pokario pradžioje buvo nutiestos kelios pirmosios klasės niveliacijos linijos, kertančios Lietuvos teritoriją ir priklausančios Sovietų Sąjungos niveliacijos tinklams. Kiek vėliau 20 a. antroje pusėje šių linijų niveliacija buvo kartota. Pagrindinio niveliacijos tinklo, sudaryto Lietuvos teritorijoje iki sovietmečio pabaigos, linijų paskutinės niveliacijos metai ir tikslumo klasės nurodytos 1.10 pav. Įvairių laikmečių Lietuvos teritorijos niveliacijos tinklai apžvelgti I. Liesio, S. Kazakevičiaus, B. Krikštaponio ir kt. autorių.

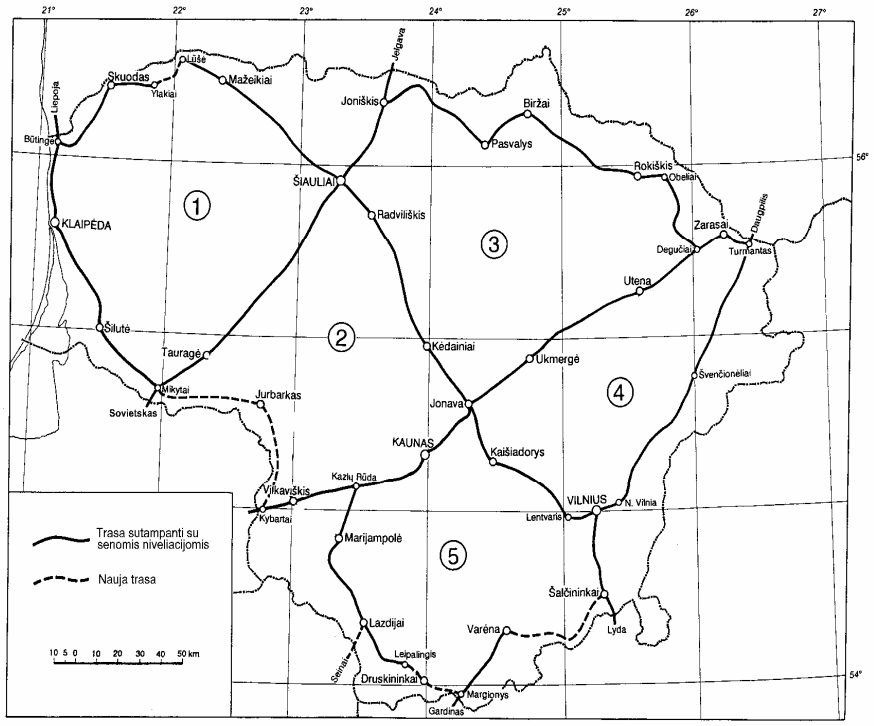


1.10 pav. *Lietuvos teritorijoje iki sovietmečio pabaigos sudarytas pagrindinis niveliacijos tinklas*

1955 m. buvo pradėtas kurti vientisas Europos niveliacijos tinklas (VENT) (angl. *The United European Levelling Network* – UELN). Pirmiausia šis tinklas buvo projektuojamas Vakarų Europos valstybių reikmėms. Atraminiu tašku buvo priimtas Amsterdamo mareografas. 1960 m. tinklas išlygintas ir pavadintas UELN – 55. 1971 m. Tarptautinė geodezijos ir geofizikos sąjunga nusprendė atlikti naują tinklo išlyginimą. Darbai pradėti 1973 m., o galutinai tinklas išlygintas 1986 m. Rezultatai paskelbti kaip UELN – 73/86 (Ernsperger *et al.* 1994).

1994 m. Varšuvoje EUREF simpoziumo metu vientisas Europos niveliacijos tinklas (VENT) buvo plečiamas kaip UELN – 95 (Lang, Sacher 1995; Lang *et al.* 1996; Lang, Sacher 1997; Sacher *et al.* 1998; Sacher *et al.* 1999). Tinklą pasiūlyta plėsti iki Juodosios jūros vakarų pakrantės bei apjuosti Baltijos jūrą. 1998 m. vadovaujantis EUREF simpoziumo, įvykusio Bad Neuenahr – Ahrweiler (Vokietija), imta rengti ir Lietuvos niveliacijos tinklo duomenis. Europos vertikaliojo tinklo plėtimo poreikis Lietuvos teritorijoje, niveliacijos tinklo duomenų parengimas vientisam Europos niveliacijos tinklui sudaryti bei esamų precizinės niveliacijos tinklų analizė pateikta darbuose (Paršeliūnas *et al.* 2000; Petroškevičius, Paršeliūnas 1998; Kumetaitis *et al.* 1994; Jucevičiūtė *et al.* 2003).

1998 m. Lietuvoje pradėtas kurti valstybinis geodezinis vertikalusis pirmosios klasės tinklas, kuris baigtas 2006 m. Matavimus atliko VGTU Geodezijos institutas. Tinklą sudaro niveliacijos linijos, sujungtos į 5 poligonus. Bendras tinklo perimetras – 1962 km (1.11 pav.). 1998–1999 bei 2001–2006 m. atliktų matavimų duomenys bei rezultatai pateikti Geodezijos instituto mokslo darbų ataskaitose. Įvairių laikotarpių niveliacijų charakteristikos pateiktos 1.1 lentelėje. Lietuvos niveliacijos tinklo atnaujinimo, sutankinimo ir apdorojimo problemas nagrinėjo S. Kazakevičius, A. Zakarevičius, J. Skeivalas, P. Petroškevičius, E. Paršeliūnas, B. Krikštaponis, R. Putrimas, J. Stepanovienė ir kt. autoriai.



1.11 pav. *Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo schema*

1.1 lentelė. *Tiksliųjų niveliacijų charakteristikos*

Eil. Nr.	Metai	Įmonė, atlikusi matavimus	Matavimų tikslumas, mm/km
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė			
1.	1931–1933	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
2.	1965	KPI Geodezijos katedra	0,46
3.	2004	VGTU Geodezijos institutas	0,47
Šiauliai–Tauragė–Mikytai			
4.	1931–1932–1933	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
5.	1948	Vakarų aerogeodezinė įmonė	0,60
7.	1976	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 5-oji įmonė	0,63
8.	2002	VGTU Geodezijos institutas	0,40
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Butingė			
9.	1936	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
10.	1954	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdyba Maskvos aerogeodezinė įmonė	0,30–0,32
11.	1963–1964	KPI Geodezijos katedra	0,5
12.	1973–1975	VISI Geodezijos katedra	0,37
13.	2003	VGTU Geodezijos institutas	0,42
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai			
14.	1934–1937	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
	1948	Vakarų aerogeodezinė įmonė	0,47
15.	1954	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdyba Maskvos aerogeodezinė įmonė	0,30–0,32
16.	1970	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 7-oji įmonė	0,47
17.	1998	VGTU Geodezijos institutas	0,39
Vilnius–Jonava			
18.	1934	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
19.	1948	Vyriausioji geodezijos ir kartografijos valdyba	0,60
20.	1970–1971	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 7-oji įmonė	0,53
21.	1998	VGTU Geodezijos institutas	0,36
Jonava–Zarasai–Turmantas			
22.	1935–1936	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
23.	1980	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 5-oji įmonė	0,62
24.	2005	VGTU Geodezijos institutas	0,38
Turmantas – Vilnius			
25.	1948	Vyriausioji geodezijos ir kartografijos valdyba	0,60
26.	1968	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 7-oji įmonė	0,68
27.	1985–1987	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 5-oji įmonė	0,69
28.	2005–2006	VGTU Geodezijos institutas	0,34

1.1 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Metai	Įmonė, atlikusi matavimus	Matavimų tikslumas, mm/km
Jonava–Šiauliai–Joniškis			
29.	1933–1934–1938–1940	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
30.	1948	Vyriausioji geodezijos ir kartografijos valdyba	0,60
31.	1970–1971	Vyriausiosios geodezijos ir kartografijos valdybos 7-oji įmonė	0,53
32.	2002	VGTU Geodezijos institutas	0,41
33.	2004	VGTU Geodezijos institutas	0,48
Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena			
34.	1937–1938	Lietuvos krašto apsaugos ministerija	0,27
35.	1998	VGTU Geodezijos institutas	0,47

1997–1998 m. drauge su Lenkijos geodezininkais Lietuvos geodezinis vertikalusis tinklas buvo susietas su Lenkijos vertikaliuoju tinklu. Gauti jungtiniai Baltijos valstybių ir Lenkijos aukščių tinklo duomenys buvo įtraukti į VENT duomenų bazę.

Nuo 1993 m. prie Baltijos jūros lygio (BSL) projekto darbų prisideda ir Lietuva. Į šį tinklą įtrauktas Klaipėdos mareografas bei Vilniaus ir Šiaulių GPS stotys (Paršeliūnas 2008; Paršeliūnas, Morozas 2007). Šio projekto tikslai – sudaryti bendrą Baltijos jūros regiono aukščių sistemą, spręsti geoido nustatymo problemas, tirti geodinaminius procesus bei atlikti kitus tyrimus.

Kadangi atskiros niveliacijų linijos matuotos po 3–4 kartus, o kai kur ir po 5–6 kartus, yra galimybė tirti Žemės plutos judesių kaitą einant laikui.

Sudarytas Lietuvos valstybinis geodezinis vertikalusis tinklas atitinka naujas geodezijos technologijų ir mokslinių klausimų sprendimo reikmes bei sudaro galimybę Lietuvoje pradėti naujos kokybės dabartinių Žemės plutos judesių taikomuosius tyrimus. Lietuvos mokslininkų dalyvavimas tarptautiniuose geodeziniuose projektuose sudaro realių galimybių Lietuvoje atliekamus regioninius dabartinių Žemės plutos judesių tyrimus integruoti į tarptautines geodinaminių tyrimų programas.

1.5. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas

Iš literatūros šaltinių analizės matyti, kad sudaryti Lietuvos ir gretimų teritorijų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai labai skiriasi. Tokių skirtumų esminės priežastys gali būti keturios. Pirmoji priežastis susijusi su geodeziniais matavimais. Antroji priežastis gali būti vertikaliųjų judesių savybių kaita einant laikui. Todėl pagal skirtingais metais atliktų niveliacijų matavimus sudaryti vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiai gali labai

skirtis. Trečioji svarbi žemėlapių nesutapimo priežastis gali būti susijusi su teritorijos geologinių charakteristikų naudojimu, sudarant žemėlapį pagal geodezinių matavimų rezultatus. Nesant vieningos, matematiškai pagrįstos georodiklių taikymo metodikos, šių rodiklių įtaka, sudarant žemėlapius su viena ar kita žemėlapio autorių nagrinėjamojo proceso suvokimo koncepcija, buvo interpretuojama grynai euristiniu būdu. Ketvirtoji priežastis, esant palyginti retam kartotinų niveliacijų tinklui, vertikaliųjų judesių greičių izolinijos poligonų viduje sudarant žemėlapius, išbrėžiamos tiesinio interpoliavimo būdu, neįvertinant teritorijos geologinių ypatumų, arba jos poligonų viduje koreguojamos laikantis asmeninės žemėlapio autorių koncepcijos.

Įvertinant dabar turimų Lietuvos teritorijoje niveliacijų duomenis ir laikantis tyrėjų pagrįstos koncepcijos, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ankstesniojo Žemės plutos tektoninio aktyvumo tąsa, naujais tyrimais galima rasti pagrįstus atsakymus į kai kuriuos minėtus neaiškumus. Turint po kelis kartus kartotas niveliuotas linijas, galima detaliai ištirti dabartinių Žemės plutos judesių kaitos einant laikui ypatumus. Atsižvelgiant į tai, kad Lietuvos teritorijoje susiformavusi stora nuosėdinė Žemės danga, šis regionas gali būti geras poligonas sudaryti ir patikrinti bendro geodezinių matavimų ir nuosėdinės Žemės dangos sluoksnių geometrinių charakteristikų bei kitų georodiklių apdorojimo metodiką ir ją panaudoti sudarant naująjį Žemės plutos judesių žemėlapį. Sąsajoms tarp objektyvių Žemės plutos judesių bei teritorijos georodiklių nustatyti bei geotektoniniams rezultatams interpretuoti siūloma taikyti matematinės statistinės bei daugiakriterinės analizės metodus.

Įvertinant mokslinėje literatūroje mažai išnagrinėtus klausimus yra tikslinga, žinant darbo tikslą, išspręsti šiuos uždavinius:

- ištirti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaitą einant laikui Lietuvos teritorijoje;
- nustatyti vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajas;
- išnagrinėti galimybes ir pasiūlyti metodiką dabartinių Žemės plutos judesių greičių žemėlapiui Lietuvos teritorijoje sudaryti, taikant regresinius modelius;
- taikant siūlomą metodiką sudaryti Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį;
- išnagrinėti galimybes ir pasiūlyti metodiką dabartinių Žemės plutos judesių geotektoniniam interpretavimui taikyti daugiakriterinę analizę;
- ištirti sudaryto taikant regresinius modelius dabartinių Žemės plutos judesių žemėlapio atitiktį matavimų rezultatams.

2

Tyrimų metodika

Skyriuje pateikiamos išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių nustatymo bei judesių greičių ir georodiklių kompleksinio vertinimo metodikos.

2.1. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių nustatymas pagal kartotinių niveliacijų rezultatus

Vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmės per laikotarpį tarp kartotinių niveliacijų ir jų reliatyvūs greičiai gali būti skaičiuojami kiekvienoje pakartotų niveliacijų linijoje pradinio tos linijos taško atžvilgiu arba susieti visame pakartotų niveliacijų tinkle pasirinkto vieno pradinio taško atžvilgiu. Absoliutūs judesių greičiai susiejami su mareografiniais matavimais.

Kai vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmės ir judesių greičiai skaičiuojami kiekvienoje niveliacijos poligono linijoje atskirai, jų reliatyvios reikšmės nustatomos linijos pradinio taško atžvilgiu. Kai atliekami detalūs Žemės plutos judesių skaičiavimo tyrimai konkrečiose linijose, tokia vertikaliųjų judesių ir jų greičių nustatymo metodika padidina gautųjų tyrimo rezultatų tikslumą, nes čia neturi įtakos pradinių punktų paklaidos bei judesių nustatymo nuo pradinių punktų iki nagrinėjamos linijos paklaidos. Tokiu atveju apskaičiuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių paklaidos atskirose linijose priklauso tik nuo niveliacijų tikslumo šiose linijose ir nėra veikiamos siejančių nagrinėjamąją liniją su pradiniais punktais kitų matavimų paklaidų.

Reliatyvių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių skaičiavimas

niveliacijos linijose. Taikant kartotinių tiksliųjų niveliacijų metodą dabartiniams vertikaliesiems Žemės plutos judesiams nustatyti, galima taikyti du būdus: 1) kai tarpusavyje palyginami niveliacijos ženklų aukščiai; 2) kai palyginami tarp gretimų punktų išmatuoti aukščių skirtumai.

Palyginant ženklų aukščius, geodezinio ženklo vertikalių judesių greitis bus

$$V_i = \frac{H_i^{''} - H_i^{'}}{t}, \tag{2.1}$$

čia: i – geodezinio ženklo numeris; $H_i^{''}$ – antrojo matavimo metu nustatytas geodezinio ženklo aukštis; $H_i^{'}$ – pirmojo matavimo metu nustatytas aukštis; t – laiko tarpas tarp kartotinių matavimų.

Nustatant vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių aukščius pagal geodezinių ženklų aukščių pokyčius reikia, kad abi niveliacijos būtų apdorotos toje pačioje aukščių ir sunkio sistemoje. Kadangi vertikaliesiems Žemės plutos judesiams nustatyti naudojamos įvairiu laiku atliktos niveliacijos, kurių rezultatai apdoroti skirtingose aukščių sistemose, šį būdą pritaikyti praktikoje sudėtinga, o kartais ir neįmanoma. Šis būdas turi ir kitų nepageidaujamų savybių. Viena svarių neigiamų savybių yra ta, kad nemažas papildomų paklaidų šaltinis yra reperių aukščių nustatymo atžvilgiu pasirinktų pradinių taškų paklaidos. Kurioje nors niveliacijos tinklo linijoje, esant stambių paklaidų, tinklo išlyginimo metu jos persiskirsto ir dalis jų deformuoja kitų tinklo linijų matavimus. Gali turėti įtakos matavimų redukavimo į geopotencialines aukščių sistemas paklaidos, redukavimo metodikų skirtumai. Rezultatus veikia paklaidos dėl Žemės plutos judesių įtakos tinklo sudarymo laikotarpiu.

Minėtų neigiamų savybių neturi vertikaliųjų judesių greičių nustatymo būdas, kai jiems apskaičiuoti naudojami tiesiogiai tarp gretimų geodezinių ženklų išmatuoti aukščių skirtumai. Tuomet reliatyvus vieno geodezinio ženklo vertikaliojo judesio greitis kito geodezinio ženklo atžvilgiu bus

$$v_{ij} = \frac{h_{ij}^{''} - h_{ij}^{'}}{t}, \tag{2.2}$$

čia: $h_{ij}^{'}$, $h_{ij}^{''}$ – pirmojo ir antrojo matavimų metu išmatuoti aukščių skirtumai tarp geodezinių ženklų i ir j; t – laiko tarpas tarp pakartotų matavimų.

Niveliavimo trasoje esančių geodezinių ženklų vertikaliųjų judesių reliatyvūs greičiai pradinio trasos taško atžvilgiu apskaičiuojami kaip gretimų reperių tarpusavio vertikaliųjų judesių vienas kito atžvilgiu greičių kumuliacinės sumos

$$v_k = \sum_{i=1}^{k} v_{i-1,\,i}, \tag{2.3}$$

čia $i = 0, 1, ..., k$ – geodezinių ženklų niveliacijos eigoje numeriai.

Kad būtų galima išvengti aukščių ir sunkio sistemų įtakos, skaičiuojant vertikaliųjų judesių greičius, (2.2) naudojami neišlyginto niveliacijos tinklo

tiesiogiai išmatuoti aukščių skirtumai, nepataisyti redukavimo į atitinkamą geopotencialinių aukščių sistemą (normalinę ar kt.) pataisomis. Naudojant nepataisytus ir neišlygintus aukščių skirtumus, aukščių perdavimo nuo pradinių punktų paklaidos neturi įtakos, rezultatų nedeformuoja kitos gretimose linijose pasitaikančios stambesnės matavimų paklaidos, t. y. matavimų paklaidos lokalizuojamos.

Šiuo atveju aukščių ir sunkio sistemos neturi įtakos judesių greičiams nustatyti, tad tyrimams galima naudoti įvairių metų geodezinių matavimų duomenis.

Atsitiktinių trikdžių ir lokaliųjų judesių anomalijų eliminavimas. Išmatuoti vertikalieji geodezinių ženklų poslinkiai ir jų greičiai, kurie sutapatinami su Žemės plutos vertikaliaisiais poslinkiais ir poslinkių greičiais, yra tektoninės ir netektoninės kilmės judesių, sukeltų įvairių gamtinių bei antropogeninių priežasčių algebrinė suma. Prie gamtinių priežasčių galima priskirti hidroterminius reiškinius, gruntinių vandenų lygio ilgalaikius pokyčius, sufozijos, cheminės erozijos reiškinius, karstinius procesus, Žemės paviršiaus potvynius ir atoslūgius dėl Saulės ir Mėnulio traukos ir kt. Antropogeninės veiklos įtaka Žemės paviršiaus judesiams gali pasireikšti požeminių vandenų ir kitų gamtos turtų eksploatavimu, hidrogeologinių bei kitų gamtos reiškinių reguliavimu, užtvankų statyba, melioracijos bei irigacijos darbais, kitokio pobūdžio dirbtiniu aplinkos keitimu, transporto sukeliamomis vibracijomis ir kt. Atskirų niveliacijos ženklų vertikaliesiems poslinkiams įtakos gali turėti vietinės gruntų savybės.

Norint eliminuoti lokalias atsitiktinių priežasčių sukeltas anomalijas, suglotninant išmatuotas judesių reikšmes, nustatyti dėsningąjį trendą bei patikrinti jo atitiktį matavimo rezultatams, gali būti taikomi matematiniai statistiniai metodai.

Vienas iš tokių metodų, gerai tinkamas nagrinėjant Žemės plutos judesių dėsningumus pagal niveliacijos linijas, yra regresinė analizė. Regresinėje analizėje priklausomas kintamasis yra vertikaliųjų judesių greičiai (arba vertikaliųjų judesių greičių gradientai), o nepriklausomas kintamasis – geodezinio ženklo atstumas nuo niveliavimo linijos pradinio taško. Paprasčiausias ir tinkamiausias nagrinėti vertikaliuosius Žemės plutos judesių savybes atskirose niveliacijos linijose yra daugianaris regresinis modelis (Martišius, Kėdaitis 2004)

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 S_i + \beta_2 S_i^2 + \beta_3 S_i^3 + ... + \beta_m S_i^m, \qquad (2.4)$$

v_i – i-tojo geodezinio ženklo vertikaliojo judesio, aprašyto regresiniu modeliu, greitis, $\beta_i (i = 0, 1, 2, ..., m)$ – regresinio modelio parametrai, S_i – i-tojo geodezinio ženklo atstumas nuo linijos pradžios.

Kai $m = 1$, gaunamas linijinis regresinis modelis.

Matricine forma galima parašyti

$$V = X\beta \ , \tag{2.5}$$

čia :

$$V = (v_1 \, v_2 ... v_n)^T \ , \tag{2.6}$$

$$\beta = (\beta_0 \beta_1 \beta_2 .. \beta_m)^T , \tag{2.7}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & S_1 & S_1^2 ... & S_1^m \\ 1 & S_2 & S_2^2 ... & S_2^m \\ . & . & . \ ... & . \\ . & . & . \ ... & . \\ . & . & . \ ... & \\ 1 & S_n & S_n^2 ... & S_n^m \end{pmatrix}, \tag{2.8}$$

m – daugianario modelio eilė (laipsnis), n – geodezinių ženklų nagrinėjamoje trasoje skaičius.

Tarius, kad matavimai vienodo tikslumo, mažiausiųjų kvadratų metodu įvertinti regresinio modelio lygties koeficientai:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T V \ , \tag{2.9}$$

V – išmatuotų vertikaliųjų judesių greičių vektorius. Regresinio modelio apskaičiuotos reikšmės

$$\hat{V} = X\hat{\beta} \, . \tag{2.10}$$

Sudaryto regresinio modelio adekvatumui išmatuotiems vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiams nagrinėjamoje trasoje įvertinti skaičiuojama *F* statistika:

$$F = \frac{(\hat{\beta} X^T - n\bar{v}^2)(n-m-2)}{(X^T X - \hat{\beta} X^T V)(m-1)}, \tag{2.11}$$

čia $\bar{v}$ – vidutinė priklausomojo kintamojo (Žemės paviršiaus vertikaliųjų judesių greičių) reikšmė nagrinėjamoje linijoje; n – geodezinių ženklų (išmatuotų judesių greičių) skaičius; m – daugianario laipsnis.

Statistika F turi $k_1 = m-1$ ir $k_2 = n-m-2$ laisvės laipsnius. Jeigu $F > F_{q(k_1,k_2)}$, tai su tikimybe $p = 1-q$ galima teigti, kad reikšmės, gautos taikant regresinį modelį, yra adekvačios išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmėms, t. y. regresiniu modeliu aprašytų Žemės plutos judesių trendas adekvatus matavimais nustatytam tikrajam fiziniam procesui. Jeigu $F < F_{q(k_1,k_2)}$, tai su tikimybe $p = 1-q$ galima teigti, kad regresinis modelis neatitinka tikrojo judesių modelio, t. y. jis neadekvačiai rodo vykstančius tikruosius Žemės paviršiaus judesius ir yra netaikytinas.

Regresijos modelio sąsajoms su tikruoju fiziniu procesu įvertinti skaičiuojamas determinacijos koeficientas:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}^T X^T \hat{V} - n\bar{v}^2}{V^T V - n\bar{v}^2}, \tag{2.12}$$

$V, \hat{V}$ – išmatuotų ir pagal regresinį modelį apskaičiuotų vertikaliųjų judesių greičių vektoriai. Nustatytų vertikaliųjų judesių greičių sklaidos dalis įvertinama pagal regresinį modelį.

Regresijos lygties koeficientų dispersijų įverčiai

$$\sigma^2(\beta_i) = \sigma^2 K_{ii}, \tag{2.13}$$

čia

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (v_i - \bar{v}_i)^2}{n - m - 1}, \tag{2.14}$$

$K_{ii} - (i = 0,1,1,...,n)$ matricos

$$K = (X^T X)^{-1} \tag{2.15}$$

diagonalieji elementai; m – daugianario laipsnis.

Koeficientų patikimumas įvertinamas taikant Stjudento t statistiką. Regresinės lygties parametrų pasikliautinieji intervalai su tikimybe $p = 1 - q$ yra

$$P\left[(\hat{\beta}_i - t_{\frac{q}{2};\, n-m-1} \sigma(\beta_i) \le \beta_i \le \hat{\beta}_i + t_{\frac{q}{2};\, n-m-1} \sigma(\beta_i)) \right] = 1 - q. \tag{2.16}$$

Koeficientas $t_{\frac{q}{2};n-m-1}$ gaunamas iš t skirsnio (2.12).

Regresinės funkcijos pasikliautinasis intervalas su tikimybe $p = 1 - q$ yra

$$P\left[\begin{array}{l} \bar{v}_i - t_{\frac{q}{2};\, n-m-1} \cdot \sigma \sqrt{1 + \bar{X}_i^T (X^T X)^{-1} \bar{X}_i} \le v_i \le \bar{v}_i + \\ + t_{\frac{q}{2};\, n-m-1} \cdot \sigma \sqrt{1 + \bar{X}_i^T (X^T X)^{-1} \bar{X}_i} \end{array} \right] = 1 - q, \tag{2.17}$$

čia

$$\bar{X}_i = (1 \quad S_i \quad S_i^2 \quad ... S_i^m)^T. \tag{2.18}$$

Analizuojant vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių dėsningumus atskirose kartotinių niveliavimų trasose, rekomenduojama glotninimui taikyti ne aukštesnius kaip trečiosios eilės daugianarinius modelius. Dažnai pakanka ir pirmosios (tiesinių) arba antrosios eilės daugianarinių modelių. Kai vertikaliųjų judesių greičių funkcijos niveliacijos linijoje pavidalas labai nedėsningas, sudaryti adekvatų regresinį modelį reikėtų aukšto laipsnio daugianario, rekomenduojama liniją skaidyti į dalis. Galimi ne tik daugianariniai, bet ir kitos formos regresiniai modeliai.

Regresiniai modeliai laikytini adekvačiais realiems matavimams tuomet, kai taikant F – statistiką patikimumo lygmuo $q \le 0{,}05$, t. y. kai modelio atitikties faktiniams matavimo rezultatams tikimybė $p \ge 0{,}95$.

2.2. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajų nustatymas

Dabartiniai tektoniniai procesai, o kartu ir dabartiniai Žemės plutos judesiai, yra ankstyvesnių geologinių periodų tektoninio aktyvumo tęsinys (Zakarevičius 1994a; 2003a). Su Žemės tektoninio aktyvumo raida yra susijusios geologinių paviršių deformacijos, susiformavusios geologinės struktūros, nuosėdinės dangos struktūrinės ir geometrinės savybės. Išmatuotus Žemės plutos judesius galima vertinti kaip dabartinius sudėtingos fizinės sistemos raidos išorinius būvio parametrus (Suveizdis 2003; Ilginytė 1998). Kadangi dabartiniai tektoniniai procesai yra ankstesnės Žemės tektoninės raidos tęsinys, tai ir išmatuotieji dabartiniai sistemos būvio parametrai turi būti akivaizdūs konkrečios teritorijos geologinės sandaros ir geofizinių laukų charakteristikose. Ir atvirkščiai, kai kurios geologinės, ypač tektoninės, Žemės plutos savybės gali turėti įtakos sistemos veikimo išoriniams parametrams.

Nors platforminiuose rajonuose tektoniniai judesiai yra lėti, greito poveikio geologinių ir geomorfologinių procesų raidai jie neturi, tačiau per ilgesnius laiko tarpsnius jie šiuos procesus veikia. Pagal stebimus kitus geologinius ir geomorfologinius ilgesnio laikotarpio raidos dėsningumus galima spręsti ir apie dabartinių Žemės plutos judesių raidos tendencijas.

Nagrinėjant geodezinius matavimus kompleksiškai su teritorijos geologiniais, geomorfologiniais, geofiziniais ypatumais, galima taikyti matematiniais metodais pagrįstas sisteminės analizės metodikas (Zakarevičius 2003a; Randjarv 1993). Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos geologinių rodiklių sąsajoms nustatyti taikyta koreliacinė analizė.

Teritoriją apibūdinančių dabartinių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių ir georodiklių, tarp kurių ieškoma priklausomybių, reikšmių matrica

$$X = \left[x_{ij} \right], \tag{2.19}$$

čia $i = 1, 2, ..., n$ – reperių numeriai; $j = 1, 2, ..., m$ – rodiklių numeriai.

Georodiklių ir vertikaliųjų Žemės putos judesių tarpusavio sąsajos apibūdinamos koreliacijos koeficientų matrica:

$$R = [r] = \frac{1}{n-1} Q^T Q, \tag{2.20}$$

čia Q – centruotoji ir normuotoji pradinių duomenų matrica; T – matricos transponavimo simbolis; n – kartotinai niveliuotų reperių skaičius.

Koreliacijos koeficientas rodo ryšio glaudumą, o jo ženklas – ryšio pobūdį ir kryptį. Kuo koreliacijos koeficiento r reikšmė artimesnė ± 1, tuo ryšys tarp kintamųjų tampresnis. Jeigu koreliacijos koeficiento reikšmė teigiama – ryšys tiesioginis, jeigu neigiama – ryšys atvirkštinis. Koreliacijos koeficiento ženklas parodo ryšio kryptį.

2.3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinių modelių sudarymas

Teritorijos tektoninio fono prognozei galima taikyti regresinį modelį. Turint kartotinių niveliacijų linijų reperių išmatuotų vertikaliųjų judesių (jie sutapatinami su Žemės paviršiaus judesiais) duomenis ir teritorijos geologinių rodiklių skaitmenines reikšmes, galima sudaryti regresinį modelį

$$V = X\beta + \varepsilon, \tag{2.21}$$

čia V – išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmių vektorius; X – teritorijos geologinių rodiklių skaitmeninių reikšmių matrica; β – modelio parametrų vektorius; ε – atsitiktinių paklaidų vektorius.

Modelio parametrai (2.21) nustatomi mažiausiųjų kvadratų metodu (Zakarevičius 1994a; Martišius, Kėdaitis 2004). Jų reikšmės:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T V. \tag{2.22}$$

Tuomet empiriškai nustatytą regresinį modelį galima rašyti

$$\hat{V} = Xb\,. \tag{2.23}$$

Regresinio modelio adekvatumas matavimo rezultatams tikrinamas taikant determinacijos koeficientą R^2 ir Fišerio F statistiką.

Determinacijos koeficiento

$$R^2 = \frac{b^T X^T V - n\overline{V}^2}{V^T Y - n\overline{V}^2}, \tag{2.24}$$

kitimo – $0 \le R^2 \le 1$. Šis koeficientas byloja apie regresinio modelio efektyvumą. Kuo determinacijos koeficientas artimesnis vienetui, tuo regresinis modelis geriau atitinka matavimo rezultatus.

Determinacijos koeficientas rodo santykį tarp išmatuotų ir regresijos modeliu aprašytų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmių. Determinacijos koeficientą padauginę iš 100, gausime procentais išreikštą rodiklį, kuris rodo, kokią išmatuotų dydžių dalį įvertina regresinis modelis.

Vertinant sudaryto regresinio modelio adekvatumą nagrinėjamoje trasoje išmatuotiems vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiams taip pat skaičiuojama

F statistika

$$F = \frac{(b^T X^T V - n\overline{V}^2)(n-m-2)}{(V^T V - bX^T V)(m-1)}, \tag{2.25}$$

čia n – geodezinių ženklų (išmatuotų judesių greičių) skaičius; m – regresinio modelio parametrų skaičius.

Statistika F turi $k_1 = m-1$ ir $k_2 = n-m-2$ laisvės laipsnius. Jeigu $F > F_{q(k_1,k_2)}$, tai su tikimybe $p = 1-q$ galima teigti, kad regresinis modelis adekvatus išmatuotiems dydžiams ir jis įvertina $100R^2$, % išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmių.

2.4. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių savybių kaitos einant laikui nustatymas

Nagrinėjant tiesinius regresinius modelius, vertikaliųjų Žemės plutos judesių intensyvumo ir krypties pokyčius einant laikui galima nustatyti iš greičių gradientų analizės. Gradientų ženklų pokyčiai reiškia Žemės plutos judesių krypties nagrinėjamoje linijoje pkytį, o greičių gradientų absoliučiųjų reikšmių pokyčiai – judesių greičių pokyčius. Vertikaliųjų judesių krypties pokyčius apibūdina regresinio modelio (2.10) greičių gradiento (2.26) ženklas, o judesių intensyvumą – gradiento reikšmė.

Norint matematiniais statistiniais rodikliais pagrįsti greičių gradientų kaitos patikimumą, atliekama gradientų matematinė statistinė analizė. Greičių gradientų skirtumų reikšmingumui pagrįsti taikoma t statistika.

Regresinio modelio greičių gradientas yra regresinės lygties išvestinė pagal kintamąjį ς. Tiesinio regresinio modelio atveju

$$\text{grad}(v) = \beta_1. \tag{2.26}$$

Tarpusavyje lyginamų regresinių modelių greičių gradientų skirtumas

$$\Delta = \text{grad}(v)' - \text{grad}(v)'' = \beta_1' - \beta_1'', \tag{2.27}$$

čia β_1' ir β_1'' – tarpusavyje lyginamų regresinių modelių koeficientai.

Standartiniai gradientų nuokrypiai yra lygūs regresijos koeficiento β_1 standartiniam nuokrypiui, t. y. $\sigma(\text{grad}v) = \sigma(\beta_1)$.

Tuomet skirtumo Δ dispersija įvertinama:

$$\sigma^2(\Delta) = \sigma^2(\beta_1') + \sigma^2(\beta_1''), \tag{2.28}$$

Statistikos t įvertis

$$t = \frac{\Delta}{\sigma(\Delta)}. \tag{2.29}$$

Kai $t > t_{q,k}$ su tikimybe $p = 1 - q$, galima teigti, kad greičių gradientų skirtumai statistiškai reikšmingi. Šiuo atveju su ta pačia tikimybe galima teigti, kad lyginamaisiais laikotarpiais greičių gradientų reikšmės pakito. Čia $t_{q,k}$ – t statistikos teorinė reikšmė esant patikimumo q ir $k = (n_1 - 2) + (n_2 - 2)$, n_1, n_2 – kartotinai niveliuotų geodezinių ženklų, panaudotų regresiniams modeliams sudaryti skaičius.

2.5. Daugiakriterinės analizės metodų taikymas išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoniniam interpretavimui

Iš atliktų Žemės plutos judesių sąsajų su teritorijos georodikliais matematinio statistinio įvertinimo nustatyta, kad išmatuoti Žemės plutos judesiai turi reikšmingus statistinius ryšius su teritoriją apibūdinančiais rodikliais (Zakarevičius 2004). Taip pat matematiniais statistiniais metodais pagrįsta, kad nagrinėjamus teritorijos rodiklius, įskaitant ir Žemės paviršiaus judesius, galima interpretuoti kaip dėl vieningos su tiesioginiais ir atvirkštiniais ryšiais fizinės sistemos veikimo atsiradusius būvio parametrus. Tačiau dėl matavimo paklaidų bei kitų su pagrindinėmis nagrinėjamos fizinės sistemos veikimo priežastimis nesusietų reiškinių atskirais nagrinėjimo atvejais gaunamos skirtingos koreliacinės priklausomybės. Todėl kyla uždavinys įvertinti, kuriais atvejais tarpusavyje susietų rodiklių grupė geriau atitinka hipotezę, kad išmatuoti Žemės paviršiaus judesiai yra paveldėti iš anksčiau vykusių tektoninių judesių, nustatyti atskirų variantų atitikties šiai hipotezei prioritetiškumą, t. y. nustatyti, kuriuose objektuose dabartinių Žemės plutos matavimų rezultatai geriau rodo tektoninių procesų tęstinumą.

Sprendžiant šį klausimą, susiduriama su daugiatikslių uždavinių sprendimu, kai reikia kompleksiškai įvertinti dažnai turinčių nevienodą įtaką ir tarpusavyje prieštaraujančių rodiklių grupės galutinį poveikį sprendiniui. Tik taip galima nustatyti variantų prioritetiškumą, įvertinant jį skaitmeniniais rodikliais.

Variantų prioritetiškumui įvertinti tinka daugiakriterinės analizės metodika, kurią realizuoti galima taikant įvairius sprendimo metodus. Šią metodiką sukūrė 1981 m. C. L. Hwang ir K. Yoon.

Daugiakriterinės analizės pradinius duomenis sudaro turinčių įtakos sprendiniui rodiklių visuma. Taikant analizės metodiką išmatuotų Žemės plutos judesių geotektoniniam interpretavimui, tokiais rodikliais imamos iš (2.20)

formulės apskaičiuoti empirinių koreliacijos koeficientų reikšmės.

Uždaviniui spręsti taikysime TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metodą (Hwang, Yoon 1981).

Pradinių duomenų matricą sudaro rodiklių reikšmės $F = [f_{ij}]$, čia i – rodiklių numeriai, j – variantų numeriai.

Toliau atliekamas pradinių duomenų matricos vektorinis normalizavimas (Triantaphyllou, E., 2000). Normalizuotos matricos elementų reikšmės

$$\bar{r}_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} f_{ij}^2}}. \tag{2.30}$$

Rodikliai turi nevienodą įtaką. Rodiklių įtakai įvertinti taikomi jų reikšmingumo rodikliai (svoriai).

Kadangi mūsų atveju matematiniais statistiniais metodais yra pagrįsta, kad išmatuoti vertikalieji Žemės plutos judesiai ir teritoriją apibūdinantys kiti nagrinėjami georodikliai sudaro vieną kompleksą ir atitinka sudėtingos fizinės sistemos su tiesioginiais ir atvirkštiniais ryšiais sampratą, rodiklių reikšmingumui įvertinti galima naudoti koreliacijos koeficientus.

TOPSIS metodu reikšmingumo rodikliai normalizuojami, kad jų suma būtų lygi vienetui. Mūsų atveju reikšmingumo rodikliai bus:

$$q_i = \frac{r_{i_0}}{\sum_i r_{i_0}}, \tag{2.31}$$

i – rodiklio, kuriam skaičiuojamas reikšmingumas, numeris.

Apskaičiavus reikšmingumus, sudaroma normalizuota svorinė matrica, kurios elementai

$$v_{ij} = q_i \bar{r}_{ij}. \tag{2.32}$$

Pagal realius normalizuotos svorinės matricos duomenis sudaromi du virtualūs modeliai, atitinkantys iš visų variantų geriausias ir blogiausias rodiklių reikšmes:

$$a^* = \left\{ \left(\max_j v_{ij} \middle| i \in I \right), \left(\min_j v_{ij} \middle| i \in I' \right), j = 1,2,...n \right\} = \left\{ v_{1^*}, v_{2^*}, ..., v_{n^*} \right\}, \tag{2.33}$$

$$a^- = \left\{ \left(\min_j v_{ij} \middle| i \in I \right), \left(\max_j v_{ij} \middle| i \in I' \right), j = 1,2,...n \right\} = \left\{ v_{1^-}, v_{2^-}, ..., v_{n^-} \right\}, \tag{2.34}$$

čia I – maksimizuojamų rodiklių aibė; I' – minimizuojamų rodiklių aibė.

Rodiklių prioritetiškumas nustatomas lyginant atskirų variantų atstumus iki

virtualaus geriausiojo ir virtualaus blogiausiojo varianto:

Alternatyvus atstumas iki geriausiojo varianto

$$S_{j^*} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (v_{ij} - v_{i^*})^2}\ , \tag{2.35}$$

o atstumas iki blogiausiojo varianto

$$S_{j^-} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (v_{ij} - v_{i^-})^2}\ . \tag{2.36}$$

Santykinis atstumas iki virtualaus geriausiojo varianto yra

$$C_{j^*} = \frac{S_{j^-}}{S_{j^*} + S_{j^-}}. \tag{2.37}$$

Santykinio atstumo reikšmės yra $1 \geq C_{j^*} \leq 0$. Pagal C_{j^*} reikšmes sudaroma prioritetinė alternatyvų eilė. Geriausia alternatyva ta, kurios C_{j^*} reikšmė didžiausia.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Išmatuotų dabartinių Žemės plutos judesių ir georodiklių kompleksiniam vertinimui siūloma taikyti matematinius statistinius metodus – koreliacinę ir regresinę analizes.
2. Skirtingose kartotinių niveliacijų linijose ar poligonuose išmatuotiems dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių rezultatams ranguoti pagal jų atitiktį tektoninių procesų tęstinumui siūloma taikyti daugiakriterinės analizės metodus.
3. Siūloma dabartinių Žemės plutos judesių regresinių modelių sudarymo metodika tinka regionams su nuosėdine danga. Lietuvos teritorija priklauso tokiems regionams ir esant pakankamai tankiam kartotinių niveliacijų tinklui bei detaliam geologiniam ištirtumui yra tinkamas poligonas tyrimams atlikti.
4. Jungiant matematinę statistinę ir daugiakriterinę analizę, išplečiamos dabartinių Žemės plutos judesių tyrimo rezultatų geotektoninio interpretavimo regionuose su nuosėdine danga galimybės.
5. Siūlant dabartinių Žemės plutos judesių tyrimo metodikas praktiniam išbandymui bei aprobavimui, tikslinga pradžioje atlikti tyrimus viename kartotinių niveliacijų poligone, o paskui ją išplėsti į visą Lietuvos teritoriją. Eksperimentus rekomenduojama atlikti poligone *Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius*, nes čia kartotinės niveliacijos sudaro uždarą poligoną ir, kaip nustatyta iš ankstesnių kitų autorių atliktų tyrimų, šioje Lietuvos dalyje yra intensyvūs Žemės plutos judesiai.

3

Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimai šiaurės rytų Lietuvoje

Tyrimai šiaurės rytų Lietuvos regione atlikti norint aprobuoti antrajame darbo skyriuje siūlomą tyrimų metodiką ir pagrįsti jos taikymo ypatumus visoje Lietuvos teritorijoje.

Skyriuje pateikiami Žemės plutos judesių savybių kaitos einant laikui tyrimo rezultatai. Išnagrinėtos sąsajos tarp geodeziniais metodais išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritoriją apibendrinančių georodiklių. Ištirti Žemės plutos judesių modeliavimo taikant regresinius modelius ir šių modelių taikymo sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapius ypatumai.

Skyriaus medžiaga publikuota autorės straipsniuose ir tarptautinių, respublikinių konferencijų medžiagose (1A–7A, 9A, 11A).

3.1. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesiai ir jų kaitos einant laikui tyrimas

Vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaitos einant laikui tyrimų tikslas nustatyti, ar pagal matavimus konstatuoti Žemės plutos judesių greičių pokyčiai bei judesių krypties inversijos patikimos, ir, remiantis šiais duomenimis, pagrįsti

kartotinių niveliacijų naudojimo, sudarant Žemės plutos judesių žemėlapius ypatumus.

Šiaurės rytų regionas pasirinktas iš ankstesnių tyrimų žinant, kad šioje teritorijoje vyksta gana intensyvūs geodinaminiai procesai. Čia einant laikui konstatuotos Žemės plutos judesių krypties inversijos (Zakarevičius 1994a; 2003a; Randjarv 1993).

Išmatuotiems vertikaliesiems Žemės plutos judesiams šiaurės rytų Lietuvos dalyje nustatyti remtasi poligone *Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius* 1935–2006 m. laikotarpiu atliktų tiksliųjų niveliacijų duomenimis. Šių niveliacijų matavimo tikslumą apibūdinančios vidutinės kvadratinės paklaidos yra 0,27–0,69 mm/km. Skirtingais laikotarpiais atliktų niveliacijų charakteristikos pateiktos 1.1 lentelėje (1.4 poskyris).

Kad galėtume eliminuoti atsitiktinių priežasčių nulemtas anomalijas išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių tyrimams, galime taikyti regresinę analizę (2.1 poskyris). Nagrinėjant atskirose niveliacijų linijose išmatuotus vertikaliuosius Žemės plutos judesius tinkamiausias yra tiesinis arba daugianaris (ne aukštesnis kaip trečiojo laipsnio) regresinis modelis, kuriame priklausomas kintamasis yra vertikaliųjų judesių greitis aprašytas regresiniu modeliu (2.4), o nepriklausomas kintamasis S – geodezinio ženklo atstumas nuo niveliavimo linijos pradinio taško. Šių modelių atitiktį realiems matavimams apibūdina determinacijos koeficientas R^2, % (2.12), Fišerio F statistika (2.11) ir jos reikšmė F_q, esant patikimumo lygmeniui $q = 0{,}05$.

Poligono linijų skirtingų laiko tarpų išmatuoti vertikalieji Žemės plutos judesiai suglotninti pirmosios (tiesinis) ir antrosios eilės daugianariais regresiniais modeliais (2.4), jų patikimumą ir adekvatumą matavimų rezultatams apibūdinantys rodikliai (2.11) bei (2.12) pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių kartotinių niveliacijų linijose regresiniai modeliai*

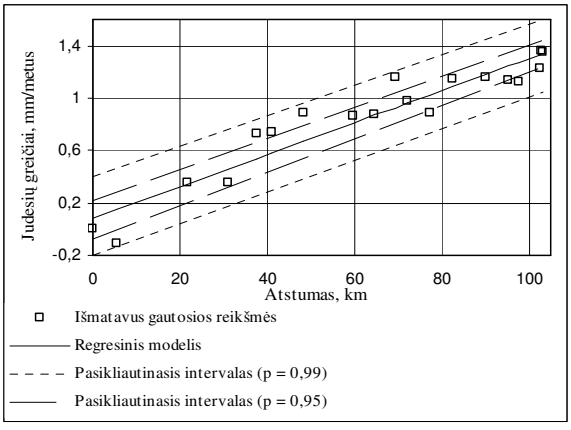
Eil. Nr.	Laikotarpis, metai	Modelio tipas	Regresinis modelis	R^2,%	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q = 0{,}05$
Vilnius–Jonava						
1	1970/71–1948	tiesinis	$V = 0{,}0794306 + 0{,}0122182\ S$	90,39	159,87	4,45
2	1970/71–1948	daugianaris	$V = -0{,}0876459 + 0{,}0214171\ S - 0{,}0000822368\ S^2$	94,01	125,59	3,63
3	1998–1970/71	tiesinis	$V = 0{,}0145198 - 0{,}00619995\ S$	82,95	58,39	4,75
4	1998–1970/71	daugianaris	$V = 0{,}00426268 - 0{,}00569516\ S - 0{,}00000448455\ S^2$	82,99	26,85	3,98
Jonava–Zarasai–Turmantas						
5	1980–1935/36	tiesinis	$V = -0{,}0506656 - 0{,}0082783\ S$	73,78	81,62	4,19
6	1980–1935/36	daugianaris	$V = -0{,}166305 - 0{,}00285029\ S - 0{,}0000385096\ S^2$	76,69	46,05	3,30
7	2005–1980	tiesinis	$V = 0{,}17389 + 0{,}0241615\ S$	92,17	282,58	4,26
8	2005–1980	daugianaris	$V = 0{,}0506179 + 0{,}0282679\ S - 0{,}0000242864\ S^2$	92,35	138,75	3,42

3.1 lentelės tęsinys

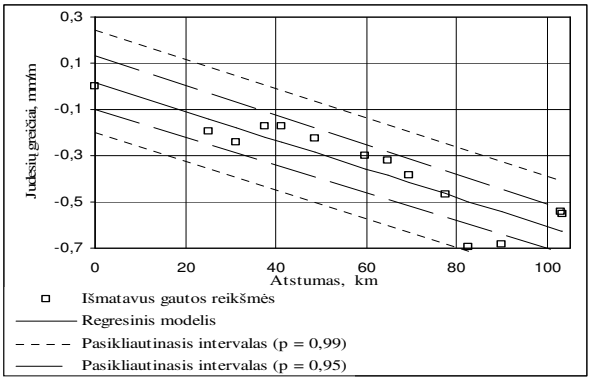
Eil. Nr.	Laikotarpis, metai	Modelio tipas	*Regresinis modelis*	R^2,%	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ q = 0,05
9	2005–1935/36	tiesinis	V = 0,111733 + 0,00455362 S	74,66	35,36	4,75
10	2005–1935/36	daugianaris	V = –0,0404743 + 0,0105668 S –0,0000401561 S^2	88,67	43,03	3,98
Turmantas – Vilnius						
11	1968–1948	tiesinis	V = 0,806167 – 0,034928 S	91,6	262,88	4,26
12	1968–1948	daugianaris	V = 0,446864 – 0,0234874 S – 0,0000664643 S^2	92,3	138,53	3,42
13	2005/06–1985/87	tiesinis	V = 0,358233 – 0,0437929 S	96,38	399,18	4,55
14	2005/06–1985/87	daugianaris	V = 0,457215–0,0480879 S + 0,0000313674 S^2	96,44	189,43	3,74
15	1985/87–1968	tiesinis	V = –0,604423 + 0,0627611 S	95,62	311,06	4,19
16	1985/87–1968	daugianaris	V = –0,719286 + 0,0670938 S – 0,0000286866 S^2	95,65	297,07	3,36

Iš 3.1 lentelės duomenų matyti, kad taikant tiesinį bei antrosios eilės daugianarį regresinį modelį šiaurės rytų Lietuvos teritorijos dalyje gana adekvačiai (su tikimybe $p \geq 0{,}95$) bendruosius vertikaliųjų judesių greičius atspindi pirmosios eilės (tiesiniai) modeliai. Nagrinėjamose linijose $F > F_{q(k_1,k_2)}$, taigi su tikimybe $p = 1 - q \geq 0{,}95$ galima teigti, kad reikšmės, gautos taikant tiesinį regresinį modelį, yra adekvačios išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių reikšmėms.

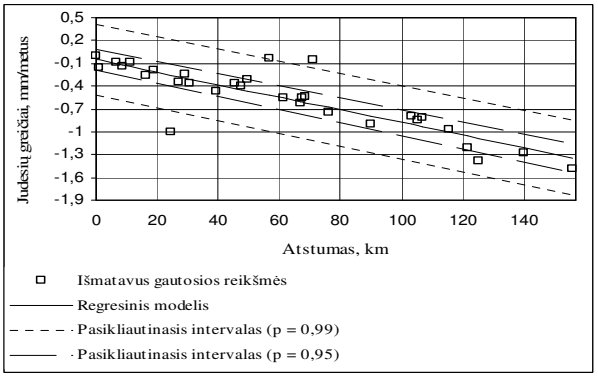
Niveliacijų linijose išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių matavimų rezultatai, tiesiniai regresijos modeliai (2.4) ir jų pasikliautinieji intervalai (2.17) su tikimybėmis $p = 0{,}95$ ir $p = 0{,}99$ būdingiausiais skirtingų vertikaliųjų judesių savybių laikotarpiais grafiškai atvaizduoti 3.1–3.6 pav.



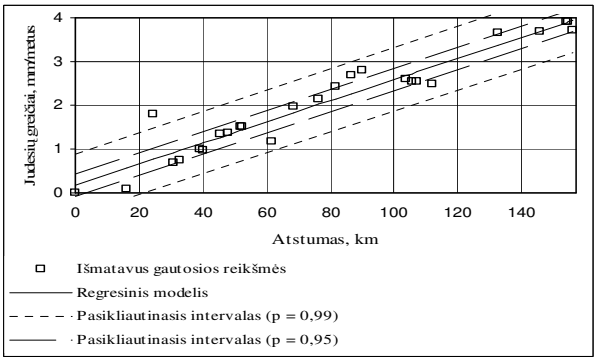
3.1 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1970/71–1948 m. Vilniaus–Jonavos linijoje (tiesinis modelis)*



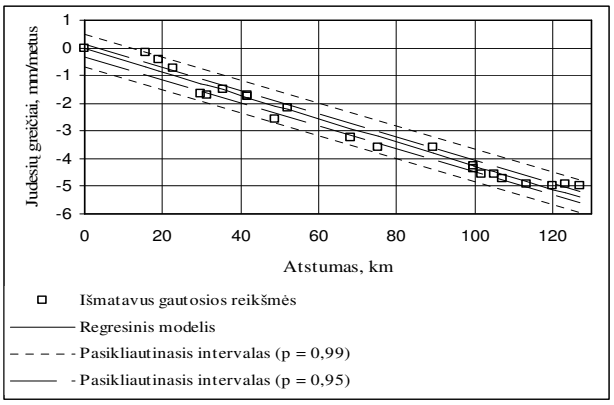
3.2 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1998–1970/71 m. Vilniaus–Jonavos linijoje (tiesinis modelis)*



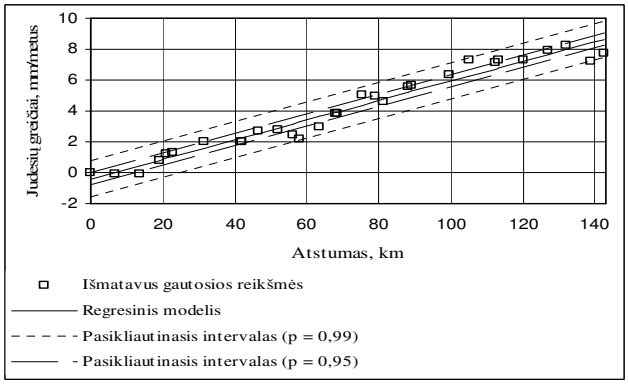
3.3 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1980–1935/36 m. Jonavos–Zarasų–Turmanto linijoje (tiesinis modelis)*



3.4 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 2005–1980 m. Jonavos–Zarasų–Turmanto linijoje (tiesinis modelis)*



3.5 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 2005/06–1985/87 m. Turmanto–Vilniaus linijoje (tiesinis modelis)*



3.6 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1985/87–1968 m. Turmanto–Vilniaus linijoje (tiesinis modelis)*

Iš pateiktų 3.1–3.6 paveikslų matyti, kad atskirais laiko tarpais tarp kartotinių niveliacijų keičiasi vertikaliųjų judesių kryptys tose pačiose trasose, t. y. galima konstatuoti, kad einant laikui atsiranda judesių inversijos požymių. Pvz., linijoje *Turmantas–Vilnius* 2005/06–1985/87 metais (3.5 pav.) ir 1968–1948 metais (A priedas) (vertikaliųjų judesių kryptis yra viena, o 1985/87–1968 metų laikotarpiui (3.6 pav.) – kita. Judesių greičių kaitos amplitudė panaši. Panašus dėsningumas *Jonavos–Zarasų–Turmanto* linijoje 2005–1980 m. (3.4 pav.) bei 1980–1935/36 m. (3.3 pav.) ir linijoje *Vilnius–Jonava* 1998–1970/71 (3.2 pav.) ir 1970/71–1948 m. (3.1 pav.) laiko tarpais.

Nagrinėjant tiesinius regresinius modelius (2.4), vertikaliųjų Žemės plutos judesių intensyvumo ir krypties pokyčius einant laikui galima nustatyti iš greičių gradientų analizės (2.4 poskyris). Gradientų ženklų pokyčiai reiškia Žemės plutos

judesių krypties nagrinėjamoje linijoje pokytį, o greičių gradientų absoliučiųjų reikšmių pokyčiai – judesių greičių pokyčius.

Tiesinių regresijos modelių nagrinėjamojo poligono linijose gradientų analizės rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių niveliacijų linijose tiesinių modelių gradientų analizė*

Laiko tarpas, metai	$grad(v)$	$\sigma(grad\,v)$	Statistika t	Patikimumo lygmuo q
Vilnius–Jonava				
1970/71–1948	0,0122	0,0010	12,6	$q < 0{,}01$
1998–1970/71	–0,0062	0,0008	7,6	$q < 0{,}01$
Jonava–Zarasai–Turmantas				
1980–1935/36	–0,0082	0,0009	9,0	$q < 0{,}01$
2005–1980	0,0242	0,0014	16,8	$q < 0{,}01$
2005–1935/36	0,0045	0,0008	5,9	$q < 0{,}01$
Turmantas – Vilnius				
1968–1948	–0,0349	0,0021	16,2	$q < 0{,}01$
2005/06–1985/87	–0,0438	0,0022	20,0	$q < 0{,}01$
1985/87–1968	0,0628	0,0025	24,7	$q < 0{,}01$

3.2 lentelėje judesių greičių gradientų reikšmės $\mathrm{grad}\,(v)$ ir gradientų standartiniai nuokrypiai $\sigma(\mathrm{grad}\,v)$, t statistikos įverčiai ir jų patikimumo lygmuo.

Iš 3.2 lentelės duomenų matyti, kad gradientų reikšmės (2.26) statistiniu požiūriu nustatytos patikimai, nes visais nagrinėtais atvejais t statistikos patikimumo lygmuo $q < 0{,}01$ (2.29), t. y. tikimybė, kad apskaičiuotos gradientų reikšmės apibūdina Žemės plutos vertikaliųjų judesių savybes, $p \geq 0{,}99$.

Kad būtų galima nustatyti, ar vertikaliųjų Žemės plutos judesių savybės keičiasi einant laikui, atlikta greičių gradientų skirtumų analizė. Palyginti nevienodo judesių pokyčio tose pačiose linijose laikotarpiais tarp kartotinių niveliacijų (žr. 3.1–3.6 pav.) regresijos modelių greičių gradientai. Apskaičiuoti gradientų skirtumai (2.27), standartiniai nuokrypiai (2.28), t statistika (2.29) ir t statistikos reikšmė, esant patikimumo lygmeniui $q = 0{,}05$. Analizės rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. *Regresinių modelių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių gradientų skirtumų analizė*

Laiko tarpas, metai	Δ	$\sigma(\Delta)$	t	$t_{q,k}$, $(q = 0{,}05)$	Pastabos
Vilnius–Jonava					
1970/71–1948 1998–1970/71	0,0184	0,0013	14,2	2,08	$t > t_q$
Jonava–Zarasai–Turmantas					
2005–1980 2005–1935/36	0,0197	0,0016	12,3	2,06	$t > t_q$
1980–1935/36 2005–1980	0,0334	0,0017	19,6	2,02	$t > t_q$
Turmantas–Vilnius					
2005/06–1985/87 1985/87–1968	0,1066	0,0033	32,3	2,02	$t > t_q$
1968–1948 2005/06–1985/87	0,0089	0,0031	2,9	2,03	$t > t_q$

Remiantis 3.3 lentelėje gautais rezultatais, su tikimybe, ne mažesne nei $p = 0{,}95,$ galima teigti, kad vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių pobūdis nagrinėtose linijose, t. y. (intensyvumas ir kryptis) einant laikui kinta, nes visais lygintais atvejais $t > t_{k,q}$.

Apie sudarytų išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių regresinių modelių adekvatumą matavimo rezultatams galima spręsti ir iš regresinių modelių analizės. Pagal (2.17) formulę apskaičiuoti regresinių modelių pasikliautinieji intervalai, esant patikimumo lygmeniui $q = 0{,}01$ ir $q = 0{,}05,$ tai yra su tikimybėmis $p = 0{,}99$ ir $p = 0{,}95$.

Todėl galima teigti, kad suglotninti matavimų rezultatai gerai rodo faktinius matavimo rezultatus. Daugumoje nagrinėtų linijų tiesinių ir antrojo laipsnio daugianarių regresinių modelių pasikliautinųjų intervalų ribos labai artimos bei antrojo laipsnio modeliai labai nedaug skiriasi nuo tiesinių modelių (A priedas). Tai reiškia, kad šiose linijose vertikaliųjų judesių greičių ir jų gradientų kaita artima tiesinei.

Taip pat galima konstatuoti, kad visose nagrinėjamose linijose judesių greičių kitimo amplitudė yra didesnė už apskaičiuotus pasikliautinuosius intervalus, t. y. vertikaliųjų judesių greičių kitimas yra statistiškai reikšmingas. Todėl galima teigti, kad matavimais galima nustatyti objektyviai vykstantį fizinį procesą – Žemės plutos judesius. Vertikaliųjų judesių greičių kaitos ir pasikliautinųjų intervalų pločio santykis didesnis linijose, kur judesių greičių kaupimasis didesnis (*Turmantas–Vilnius, Jonava–Turmantas*) ir mažesnis ten, kur greičių kaupimosi kaita mažesnė (*Vilnius–Jonava*).

Iš 3.3 lentelėje pateiktų duomenų su tikimybe $p > 0{,}95$ galima daryti išvadą, kad patvirtinama ne tik hipotezė apie vertikaliųjų judesių krypties inversiją einant laikui, bet ir judesių gradientų kaitą skirtingais laiko tarpais, esant tai pačiai

vertikaliųjų judesių krypčiai. Todėl, nustatant pagal matavimų rezultatus vertikaliuosius Žemės plutos judesius, jų charakteristikas galima susieti tik su laikotarpiu tarp konkrečių kartotinių niveliacijų. Taigi ir sudaryti žemėlapiai tiktai rodo konkretų laikotarpį, o ne apibendrinančius rezultatus, nesiejamus su konkrečiu periodu.

3.2. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių sąsajos su teritorijos georodikliais tyrimas

Tyrimų tikslas – pagrįsti vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinių modelių sudarymo galimybes, modeliavimui taikant teritoriją apibendrinančius georodiklius.

Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajas nustatyti taikant 2.2 poskyryje pateiktą metodiką. Tyrimų rezultatai skelbti (5A) publikacijoje.

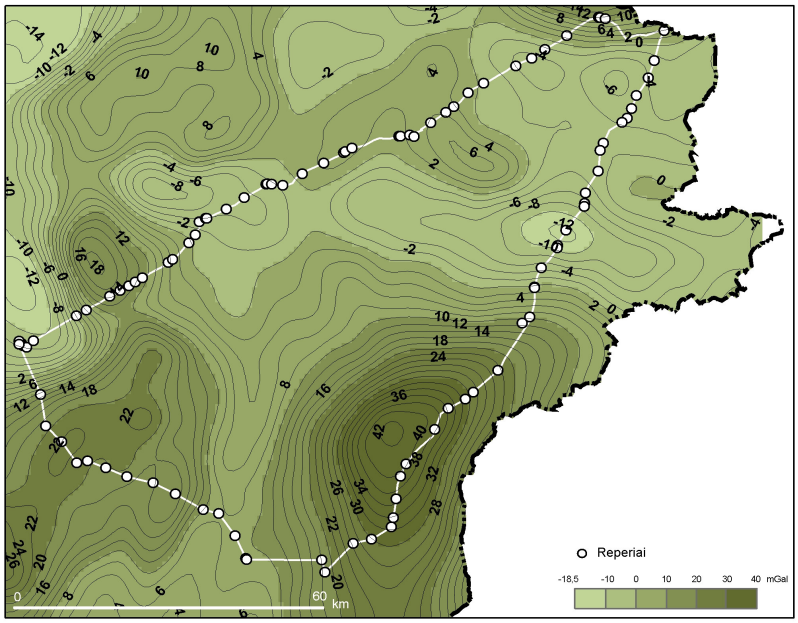
Tiriant vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių sąsajų su georodikliais nagrinėjamoje teritorijoje ypatumus, apskaičiuotos koreliacinės matricos linijose: *Vilnius–Jonava* (1998–1970/71 m.); *Jonava–Zarasai–Turmantas* (2005–1980 m.); *Turmantas–Vilnius* (2005/06–1985/87 m.) bei šias linijas sujungiant į visumą, t. y. į vieną bendrą poligoną minėtose niveliacijos linijose, vertikalieji judesių greičiai apskaičiuoti pagal (2.2), (2.3) formules, o georodiklių reikšmės nustatytos pagal reperių koordinates iš skaitmeninės duomenų bazės (Dėnas *et al*. 2005; Dėnas *et al.* 2006; Šliaupa, S. *et al.* 2005b). Georodiklių skaitmeninių modelių žemėlapiai pateikti 3.7–3.14 paveiksluose.

Gravitacinį lauką (3.7 pav.) vaizduoja Bouguer anomalijos, magnetinį lauką (3.8 pav.) – magnetinio lauko stiprio anomalijos.

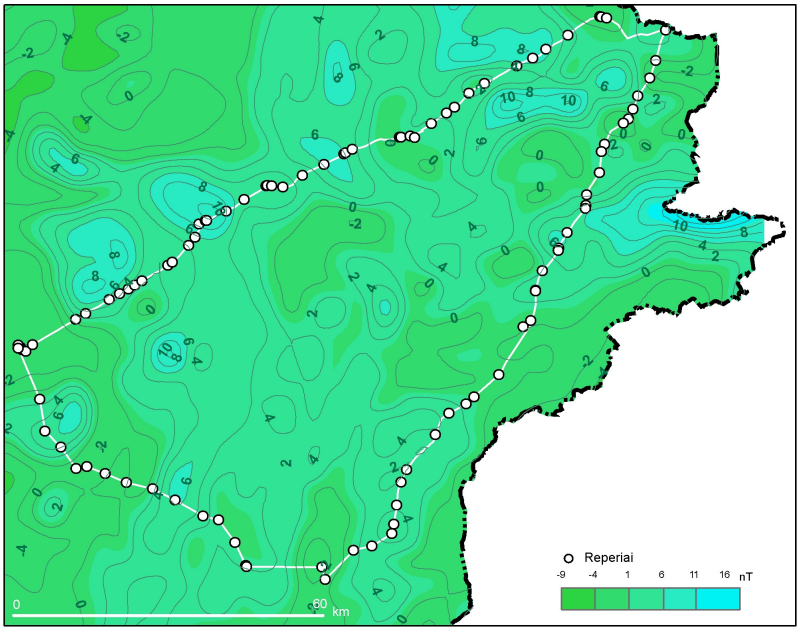
Nustatant vertikaliųjų Žemės plutos judesių sąsajas su teritorijos georodikliais, imami šie teritoriją apibūdinantys rodikliai, su kuriais ieškoma dabartinių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių v sąsajų:

x_1 – gravitacinis laukas;
x_2 – magnetinis laukas;
x_3 –Žemės paviršiaus reljefas;
x_4 – kristalinio pamato reljefas;
x_5 – prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefas;
x_6 – kvartero dangos storis;
x_7 – nuosėdinės dangos storis;
x_8 – prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storis.

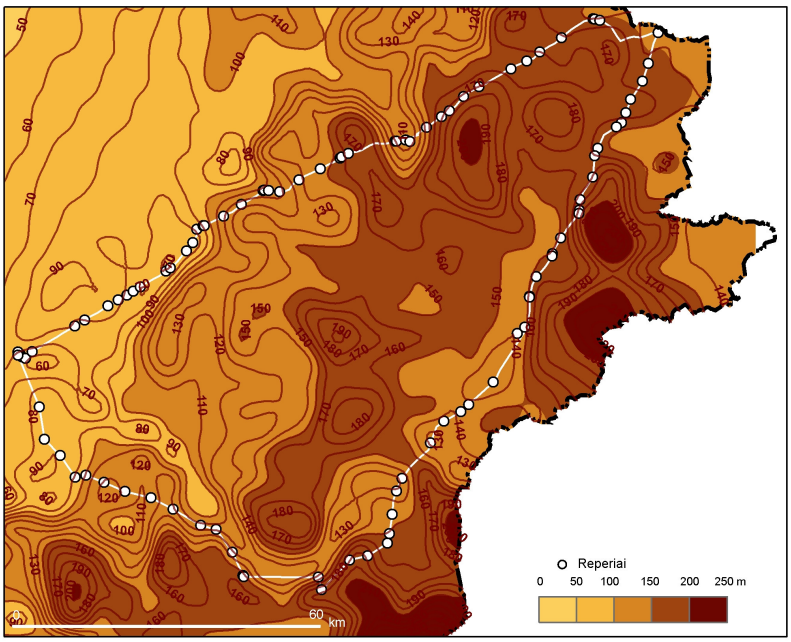
Išmatuotų vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių koreliacijos su teritorijos georodikliais koeficientai pateikti 3.4 lentelėje.



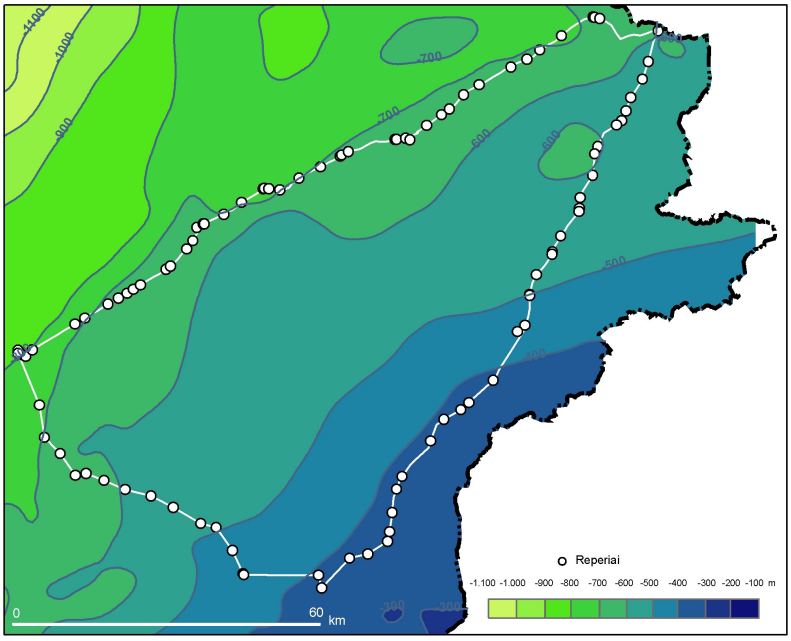
3.7 pav. *Gravitacinis laukas*



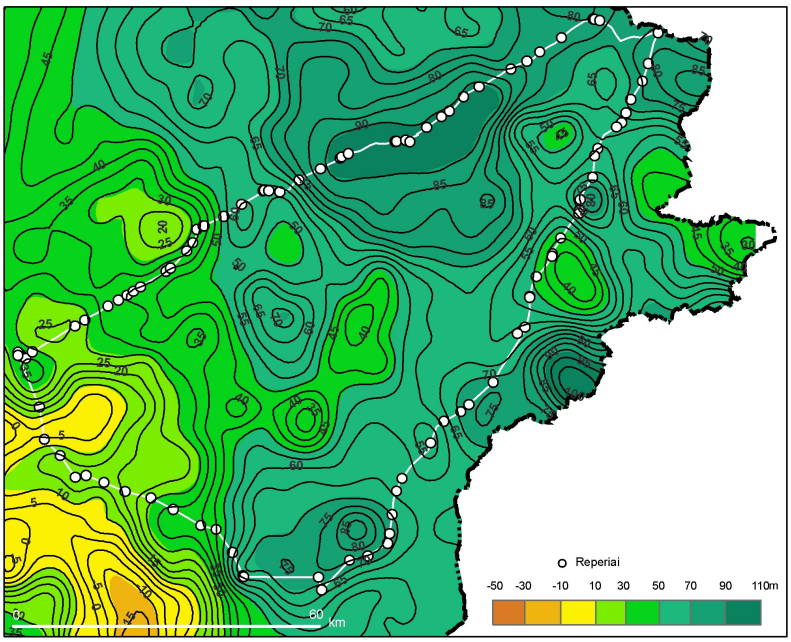
3.8 pav. *Magnetinis laukas*



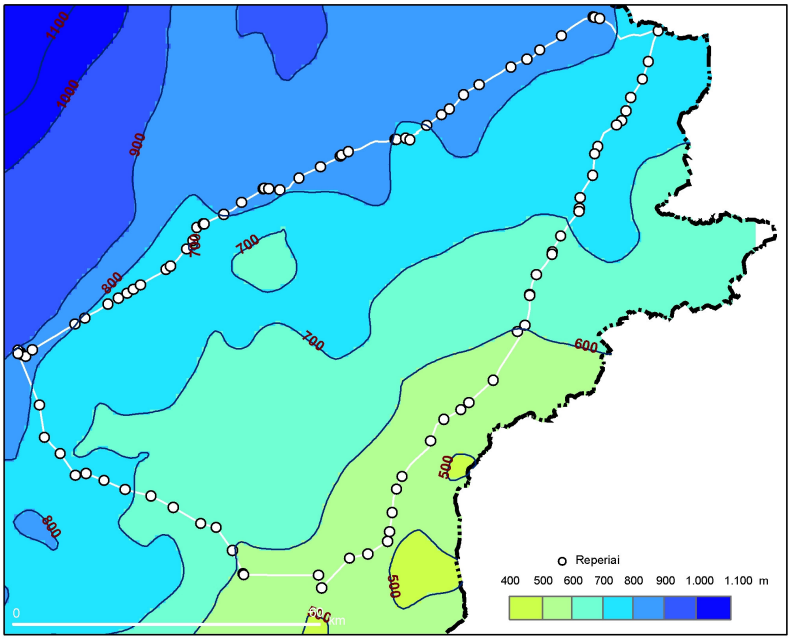
3.9 pav. *Žemės paviršiaus reljefas*



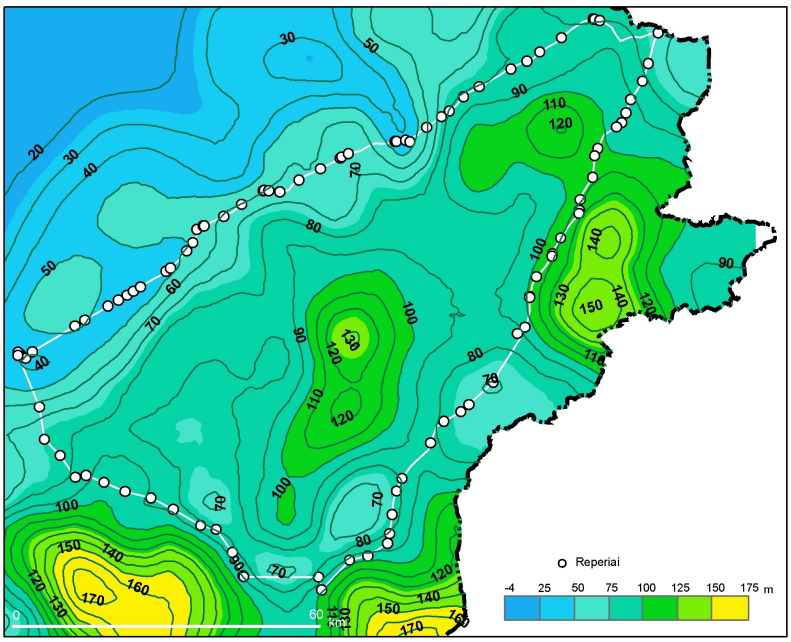
3.10 pav. *Kristalinio pamato reljefas*



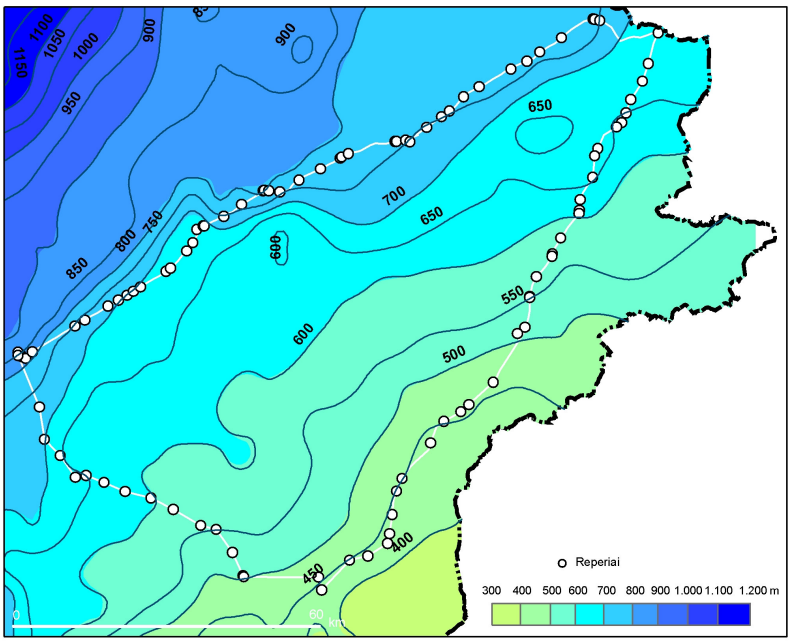
3.11 pav. *Prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefas*



3.12 pav. *Nuosėdinės dangos storis*



3.13 pav. *Kvartero dangos storis*



3.14 pav. Prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storis

3.4 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių bei georodiklių koreliacija*

$r(vx_1)$	$r(vx_2)$	$r(vx_3)$	$r(vx_4)$	$r(vx_5)$	$r(vx_6)$	$r(vx_7)$	$r(vx_8)$
Linija/ Poligonas							
Vilnius–Jonava							
0,25	0,07	0,89	0,88	0,77	0,64	–0,85	–0,85
Jonava–Zarasai–Turmantas							
0,31	–0,11	0,89	0,12	0,80	0,62	0,44	0,32
Turmantas–Vilnius							
–0,86	–0,31	0,69	–0,94	0,22	0,45	0,93	0,95
Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius (4 poligonas)							
–0,69	0,02	0,29	–0,57	0,45	–0,03	0,70	0,67

Iš 3.4 lentelės rezultatų matome, kad ne visos koreliacinės priklausomybės gana stiprios. Vidutinis kartotinių niveliacijų reperių skaičius linijose yra apie 25. Su tikimybe $p = 1 - q$ kritinę ribą, prie kurios koreliacijos koeficientas yra reikšmingas, galima apskaičiuoti iš formulės

$$t_{k,q} = r\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}\ .$$

Išsprendus šią lygtį r atžvilgiu, gaunama

$$r = \frac{t_{k,q}}{\sqrt{n-2+t^2}}\ ,$$

čia: $t_{k,q}$ – Stjudento t skirsnio su patikimumo lygmeniu q ir laisvės laipsnių $k = n-2$ šaknis; n – kartotinai niveliuotas reperių skaičius; r – koreliacijos koeficientas. Kai $n = 25$, $q = 0{,}10$, gauname kritinę ribą $r \approx 0{,}27$.

Iš pateiktų 3.4 lentelės duomenų analizės matyti, kad stipriausi vertikaliųjų Žemės plutos judesių koreliaciniai ryšiai linijoje *Vilnius–Jonava* yra su visais georodikliais, išskyrus gravitacinį lauką bei magnetinį lauką, kurių koreliacijos koeficientai $r \le 0{,}25$. Linijoje *Jonava–Zarasai–Turmantas* stipriausi koreliaciniai ryšiai su Žemės paviršiaus reljefu ir prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefu, $r \ge 0{,}83$. Linijoje *Turmantas–Vilnius* stipriausi vertikaliųjų Žemės plutos judesių koreliaciniai ryšiai yra su gravitaciniu lauku, dabartiniu Žemės paviršiaus reljefu, kristalinio pamato reljefu, nuosėdinės dangos storiu ir prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storiu $-0{,}94 \le r \le 0{,}95$. Sujungus visas linijas į bendrą uždarą poligoną, stipriausi koreliaciniai ryšiai yra su gravitaciniu lauku, kristalinio pamato reljefu, prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefu, nuosėdinės storiu bei prekvartero (pagrindinių sluoksnių) dangos storiu.

Taip pat iš 3.4 lentelės galima pastebėti, kad su kai kuriais tais pačiais georodikliais koreliacijos koeficientai visose linijose yra reikšmingi, o kitose –

nereikšmingi. Tai lemia teritorijos geologinės sąrangos ypatumai.

Iš atlikto tyrimo galima daryti išvadas, kad sąsajų tarp išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių struktūra ir stiprumas susietas su teritorijos ypatumais. Skirtingose linijose vertikaliųjų judesių koreliacijos koeficientai su tais pačiais rodikliais yra skirtingi. Atskirose linijose koreliacinių priklausomybių reikšmės yra stipresnės nei visas linijas jungiančiame poligone. Todėl galima daryti išvadą, kad sudarant regresinius modelius reikia atsižvelgti į teritorijos geologinės sandaros nevienalytiškumą. Lietuvos geologinė sandara teritoriniu požiūriu yra nevienalytė, todėl tinkamai interpretuoti geodezinių matavimų rezultatus, atskiriant juos nuo regionui būdingų su teritorijos tektonine raida susijusių rodiklių, negalima.

3.3. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai modeliai ir jų taikymo Žemės plutos judesių žemėlapiams sudaryti tyrimai

Remiantis matematinės statistinės vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių analizės rezultatais (3.4 lentelė) nustatyta, kad yra koreliacinis ryšys tarp dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių. Todėl galima teigti, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai Šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje yra natūrali geologinių procesų raidos tąsa, o tai reiškia, kad yra reali galimybė pagal teritorijos georodiklius prognozuoti pagrindinius nūdienos tektoninių procesų vyksmo bruožus, apibūdinti dabartinį tektoninį foną.

Teritorijos tektoninio fono prognozei galima taikyti regresinį modelį, kuriame priežastiniais kintamaisiais yra teritorijos georodikliai. Turint kartotinių niveliacijų linijų reperių išmatuotų vertikaliųjų judesių (jie sutapatinami su Žemės paviršiaus judesiais) duomenis ir minėtųjų teritorijos georodiklių skaitmenines reikšmes, galima sudaryti regresinį modelį. Regresiniai modeliai sudaryti taikant šio darbo 2.3 poskyryje pateiktą metodiką.

Regresiniai modeliai skaičiuoti trimis būdais:

1) taikant visus koreliacinei analizei naudotus georodiklius;

2) atsižvelgiant tik į tuos teritoriją apibūdinančius rodiklius, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$;

3) taikant atvirkštinę žingsninę regresiją, kol regresijos lygtyje lieka 2–4 didžiausiąją įtaką turintys rodikliai, esant pakankamos tikimybės modelio adekvatumo rodikliams.

Iš atliktos 3.2 poskyrio analizės matome, kad koreliacinės priklausomybės nagrinėtose linijose ir jas sujungiant į poligoną yra skirtingos, todėl regresinius modelius sudarysime atskirai kiekvienai linijai bei poligonui.

Pavienių nagrinėtų linijų bei šias linijas sujungus į vieną uždarą poligoną

gauti tiesiniai regresijos modeliai ir jų adekvatumo matavimo rezultatams rodikliai.

Regresinių modelių adekvatumui įvertinti apskaičiuotas determinacijos koeficientas $R^2\,\%$ (2.24), statistika F (2.25) bei $F_{q(k_1,k_2)}$, kai $q = 0{,}05$ (3.5 lentelė, o regresiniai modeliai – 3.6 lentelė).

3.5 lentelė. *Regresinės analizės rezultatai*

Eil. Nr.	Analizės būdas	Georodikliai								$R^2,\%$	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q=0{,}05$
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
		Vilnius–Jonava										
1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	96,21	15,87	4,82
2	2			×	×	×	×	×	×	94,84	21,46	3,87
3	3			×	×		×	×		92,85	29,24	3,63
Jonava–Zarasai–Turmantas												
4	1	×	×	×	×	×	×	×	×	92,23	25,21	2,55
5	2			×		×	×			80,27	29,84	3,05
6	3		×		×	×		×		91,03	53,29	2,84
Turmantas – Vilnius												
7	1	×	×	×	×	×	×	×	×	96,14	52,95	2,55
8	2	×		×	×			×	×	96,00	96,04	2,71
9	3	×					×		×	96,05	178,37	3,05
Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius												
10	1	×	×	×	×	×	×	×	×	81,00	30,90	2,06
11	2	×			×	×		×	×	76,20	39,06	2,35
12	3	×				×		×		75,40	64,38	2,73

Sutartiniai žymėjimai: × *– regresinį modelį sudarantys georodikliai.*

Iš 3.5 lentelėje pateiktų duomenų galima daryti išvadą, kad regresiniams modeliams sudaryti naudojant tik tuos georodiklius, kurių koreliacijos koeficiento su vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$ arba taikant atvirkštinės žingsninės regresijos metodiką, galima sumažinti regresijos lygties kintamųjų skaičių, taikant beveik tuos pačius regresinio modelio adekvatumo matavimo rezultatams rodiklius. Niveliavimo linijų *Vilnius–Jonava* ir *Turmantas–Vilnius* modelio adekvatumo rodikliai visais trimis atvejais išlieka iš esmės tie patys. Linijoje *Jonava–Zarasai–Turmantas*, kurioje Žemės plutos judesių greičių kaitos amplitudė siekia apie 4 mm per metus, taikant lygtyje mažiau kintamųjų, modelio adekvatumas pirmuoju ir trečiuoju atvejais išlieka iš esmės tas pats, o antruoju atveju – sumažėja apie 10 %, tačiau išlieka gana geras (determinacija apie 80 %). Regresijos lygtyse sumažinti kintamųjų skaičių be didelio nuostolio modelių adekvatumui galima dėl to, kad teritoriją apibūdinantys rodikliai tarpusavyje taip pat statistiškai priklausomi, t. y. vertikalieji Žemės paviršiaus judesiai ir teritorijos georodikliai tos pačios sudėtingos fizinės sistemos, kurią veikia tektoninės įtampos, išoriniai būvio parametrai. Skirtumas tik tas, kad georodikliai byloja apie ilgą geologinės raidos laikotarpį, o dabartiniai Žemės plutos judesiai – paskutinius dešimtmečius.

Nevienodas georodiklių pasiskirstymas pavienėse linijose antruoju bei trečiuoju analizės variantais patvirtina, kad sąsajos tarp georodiklių ir Žemės plutos judesių ne visur vienodos. Todėl nagrinėjant šiuo požiūriu dideles teritorijas, būtina detalią analizę atlikti teritoriniu principu, atsižvelgiant į geologinę sandarą.

Uždarojo poligono *Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius* regresinių modelių adekvatumo matavimo duomenimis, rezultatai kiek prastesni nei pavienių linijų, tačiau visais atvejais determinacija yra didesnė kaip 75 %. Dispersinės analizės rezultatai rodo, kad ir pavienių linijų, ir uždaro poligono visų modelių ir matavimo duomenų atitikimo tikimybė $p \geq 0{,}95$.

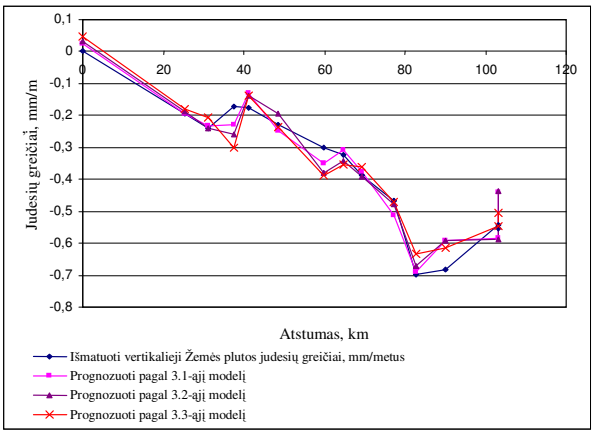
3.6 lentelė. *Regresijos modeliai*

Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
		Vilnius–Jonava
1	1	$\hat{V} = 3{,}327 - 0{,}625 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}887 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 7{,}122 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + + 9{,}530 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 3{,}532 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + 3{,}092 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 3{,}560 \cdot 10^{-2} \cdot \cdot x_7 + 5{,}509 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.1)
2	2	$\hat{V} = 2{,}914 - 7{,}705 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + 10{,}016 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 3{,}148 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + + 3{,}297 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 3{,}846 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 + 5{,}757 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.2)
		Vilnius–Jonava
3	3	$\hat{V} = 4{,}424 - 8{,}667 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + 7{,}315 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 0{,}953 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + + 6{,}739 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (3.3)
		Jonava–Zarasai–Turmantas
4	1	$\hat{V} = 8{,}431 + 1{,}723 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 7{,}961 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 0{,}0956 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + + 8{,}170 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 4{,}226 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 3{,}964 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 8{,}170 \cdot 10^{-2} \cdot \cdot x_7 - 1{,}458 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.4)
5	2	$\hat{V} = -1{,}499 + 7{,}895 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 - 4{,}980 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 4{,}709 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (3.5)
6	3	$\hat{V} = 8{,}055 - 9{,}275 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 5{,}597 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 1{,}685 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + + 4{,}193 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (3.6)
		Turmantas–Vilnius
7	1	$\hat{V} = -5{,}579 - 5{,}104 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 5{,}247 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 0{,}776 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + + 2{,}159 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 1{,}617 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 2{,}726 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 - 2{,}020 \cdot 10^{-2} \cdot \cdot x_7 + 5{,}679 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.7)

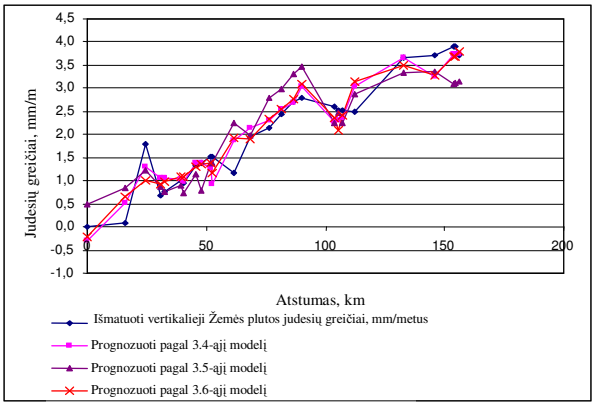
3.6 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
		Turmantas–Vilnius
8	2	$\hat{V} = -5{,}378 - 5{,}065 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}436 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + 0{,}880 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - - 3{,}727 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 + 6{,}070 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.8)
9	3	$\hat{V} = -5{,}846 - 4{,}976 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 4{,}976 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 1{,}451 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.9)
		Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius
10	1	$\hat{V} = -7{,}669 - 3{,}189 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}627 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 10{,}046 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 - - 8{,}160 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 1{,}252 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + 2{,}213 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 - 10{,}399 \cdot 10^{-2} \cdot \cdot x_7 + 3{,}093 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.10)
11	2	$\hat{V} = -6{,}562 - 3{,}333 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}251 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 3{,}405 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + + 1{,}390 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 0{,}909 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (3.11)
12	3	$\hat{V} = -5{,}590 - 3{,}689 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 3{,}147 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + 0{,}667 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (3.12)

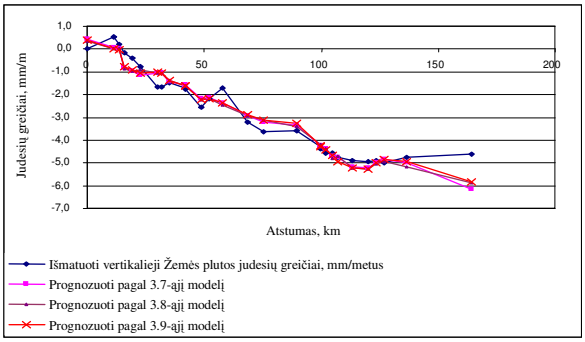
Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai ir prognozavimo rezultatai pagal visų trijų tipų regresinius modelius niveliacijų linijose (*Vilnius–Jonava*, *Jonava–Zarasai–Turmantas*, *Turmantas–Vilnius*) pavaizduoti 3.15–3.17 pav. Poligone *Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius* – 3.18 paveiksle.



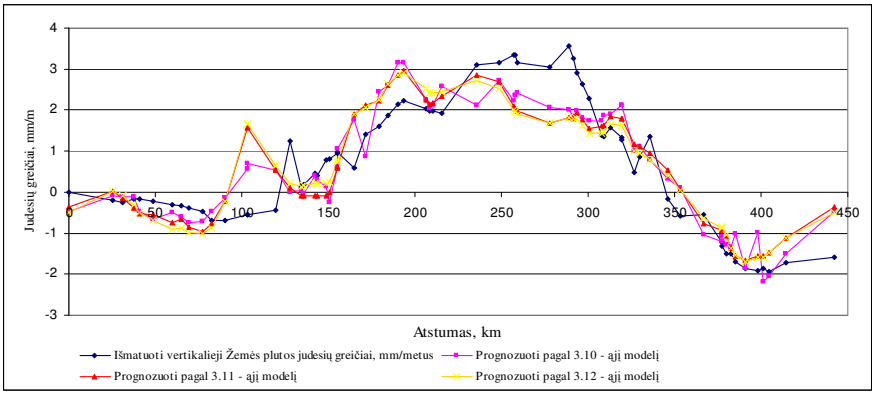
3.15 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Vilnius–Jonava grafikas (pagal 1998–1970/71 m. matavimo duomenis)*



3.16 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Jonava–Zarasai–Turmantas grafikas (pagal 2005–1980 m. matavimo duomenis)*



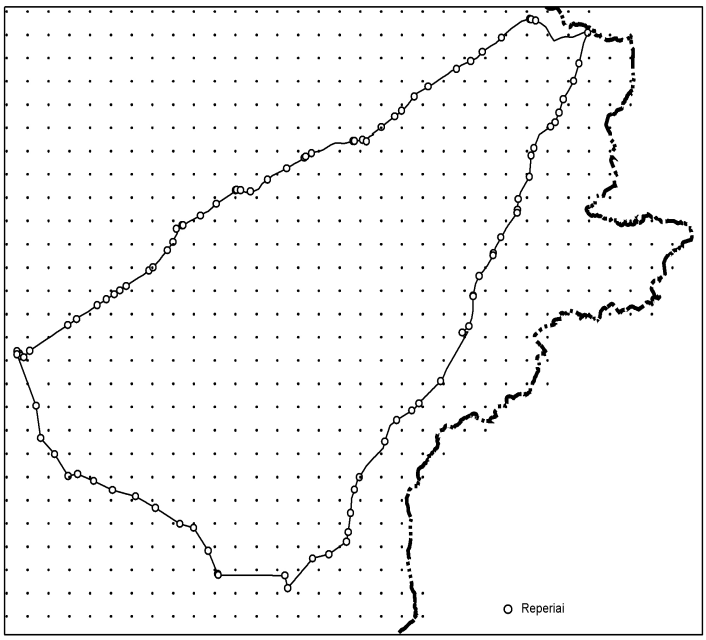
3.17 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Turmantas–Vilnius grafikas (pagal 2005/06–1985/87 m. matavimo duomenis)*



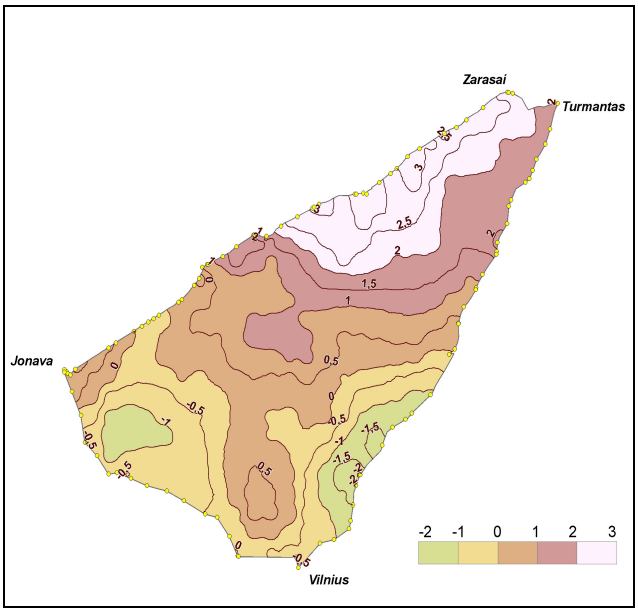
3.18 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių poligone Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius grafikas*

Iš 3.15–3.18 paveikslų matyti, kad visi regresijos modeliai gana gerai atspindi matavimų rezultatus. Modeliai, gauti visais trimis nagrinėtais būdais, labai nedaug skiriasi ir rodo bendruosius dėsningumus. Modeliai, sudaryti taikant tik rodiklius, kurių koreliacijos su vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiais koeficientų reikšmės $r \geq 0{,}50$ bei žingsninę regresiją, geriau eliminuoja lokaliąsias išmatuotų reikšmių anomalijas, t. y. pagal juos gaunami labiau apibendrinti prognozavimo rezultatai.

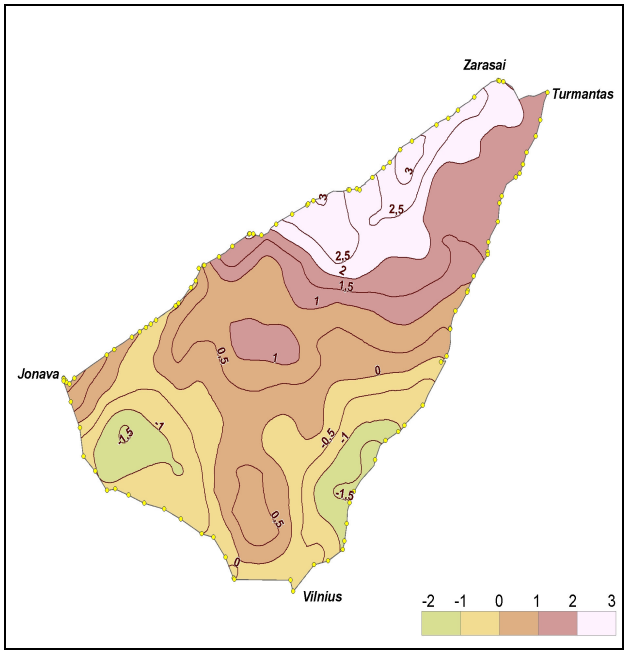
Taikant visais trimis minėtais būdais sudarytus regresinius modelius (3.6 lentelė, (3.10), (3.11), (3.12) modeliai), sudaryti uždaro poligono *Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius* vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapiai. Prognozuojant vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičius į regresijos lygtis, įeinančių argumentų (georodiklių) reikšmės nustatytos iš skaitmeninių geologinių duomenų bazių diskrečiuose taškuose, išdėstytuose 5×5 km kvadratų tinklelio viršūnėse (3.19 pav.). Žemėlapiai atvaizduoti 3.20, 3.21, 3.22 paveiksluose.



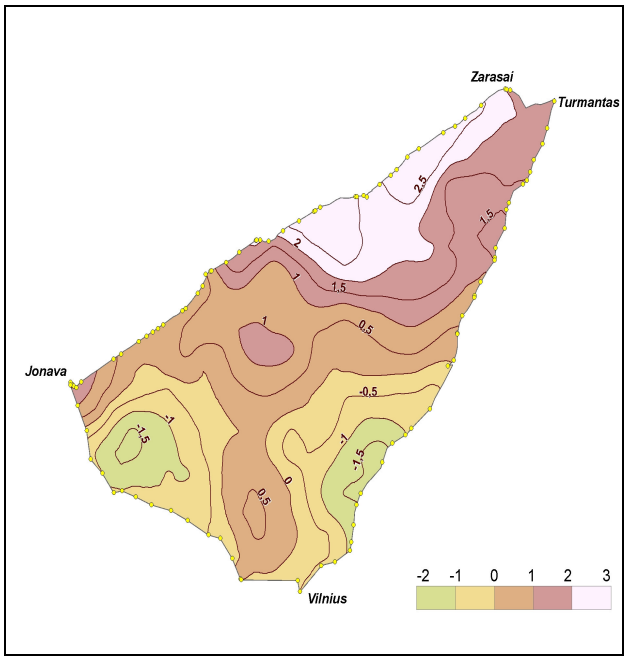
3.19 pav. *Skaitmeninio modelio tinklelis*



3.20 pav. *Pagal (3.10) regresinį modelį prognozuotas dabartinis tektoninis fonas (judesių greičiai, mm per metus)*



3.21 pav. *Pagal (3.11) regresinį modelį prognozuotas dabartinis tektoninis fonas (judesių greičiai, mm per metus)*



3.22 pav. *Pagal (3.12) regresinį modelį prognozuotas dabartinis tektoninis fonas (judesių greičiai, mm per metus)*

Iš šių paveikslų matyti, kad pagal visais trimis būdais gautus regresinius modelius sudaryti žemėlapiai labai panašūs ir rodo tuos pačius bendruosius dabartinius Žemės plutos judesių dėsningumus, tačiau antruoju atveju (kai taikomi rodikliai, kurių $r \geq 0{,}50$) ir trečiuoju (žingsninė regresija) atveju gaunami labiau suglotninti, t. y. daugiau apibendrinti rezultatai. Turint omenyje, kad regresijos modeliuose argumentai yra rodikliai, kuriuos lėmė procesai, trukę ilgus geologinius periodus, o funkcija (dabartiniai Žemės plutos judesiai) – nusako, palyginti su argumentais, labai trumpą periodą, netikslinga nagrinėjant dabartinį teritorijos tektoninį foną bei, sudarant Žemės plutos judesių greičių žemėlapius, labai detalizuoti. Todėl galima taikyti ir labiau apibendrintus, t. y. antruoju arba trečiuoju būdu sudarytus regresinius modelius.

Turint omenyje, kad atskirose linijose koreliacinės priklausomybės nevienodos koreliacijos koeficientų reikšmingumo požiūriu, didesnėse teritorijose atliekant tyrimus tikslinga žiūrėti ir į tuos rodiklius regresiniuose modeliuose, kurie, atskirai paimtose linijose, gali būti nereikšmingi.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Iš atliktų tyrimų su tikimybe $p \geq 0{,}95$ nustatyta, kad vertikaliųjų Žemės plutos judesių pobūdis (intensyvumas ir kryptis) šiaurės rytų Lietuvos teritorijos dalyje einant laikui kinta. O tai reiškia, kad nustatytos Žemės plutos judesių savybės turi būti siejamos su konkrečiu matavimus apimančiu periodu, o ne suprantamos kaip apibendrinantieji ilgo periodo duomenys.
2. Nustatyta, kad visose nagrinėtose linijose vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių kaitos amplitudė yra didesnė už su tikimybe $p = 0{,}95$ apskaičiuotas pasikliautinojo intervalo ribas. Todėl galima teigti, kad matavimais nustatyti vertikalieji Žemės plutos judesiai apibūdina realaus geodinaminio proceso vyksmo pagrindinius dėsningumus.
3. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių sąsajos su teritorijos georodikliais ne visur vienodos. Sąsajų pobūdis ir struktūra turi regioninių ypatumų. Atskirose linijose sąsajos statistiškai reikšmingesnės, nei apibendrinus linijas į vieną poligoną. Todėl, sudarant vertikaliesiems Žemės plutos judesiams modeliuoti Lietuvos teritorijoje regresinius modelius, rekomenduojama taikyti fragmentinį modeliavimą.
4. Nustatyta, kad kartotinių niveliacijų linijose vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai greičių modeliai, taikant teritoriją apibūdinančius georodiklius, su tikimybe $p \geq 0{,}95$ yra adekvatūs geodezinių matavimų rezultatams.
5. Kadangi vertikalieji Žemės plutos judesių regresiniai modeliai statistiškai adekvatūs matavimų rezultatams, juos galima taikyti Žemės plutos judesiams prognozuoti ne tik kartotinių niveliacijų linijose, bet ir kartotinių niveliacijų linijomis apribotuose poligonuose, kur nėra geodezinių matavimų. Tokia metodika leidžia išvengti subjektyvumo, įvertinant georodiklius, kai sudaromas vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis.
6. Dėl georodiklių tarpusavio priklausomybės regresiniuose modeliuose, jų skaičių, išlaikant tą pačią prognozavimo kokybę, galima sumažinti taikant atvirkštinės žingsninės regresijos metodiką.
7. Taikant georodiklius sudaryti dabartinių Žemės plutos judesių regresiniai modeliai atveria galimybes prognozuoti Žemės plutos judesius kartotinių niveliacijos poligonų viduje, t. y. ten, kur nėra tiesioginių geodezinių matavimų. Šią metodiką tikslinga taikyti sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį Lietuvos teritorijoje.
8. Sudarant regresinius Žemės plutos judesių modelius atskirais fragmentais, reikia išspręsti jų sujungimo į bendrą visumą klausimus.

4

Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje žemėlapio sudarymas taikant regresinius modelius

Skyriuje nagrinėjami dabartiniai vertikalieji Žemės plutos judesiai visoje Lietuvos teritorijoje. Nagrinėjant išmatuotus vertikaliuosius Žemės plutos judesius kompleksiškai su teritorijos georodikliais taikyta koreliacinė ir regresinė analizė. Sudarant dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį Lietuvos teritorijoje, detalūs tyrimai diferencijuojami teritoriniu principu, vėliau rezultatus sujungiant į bendrą visumą.

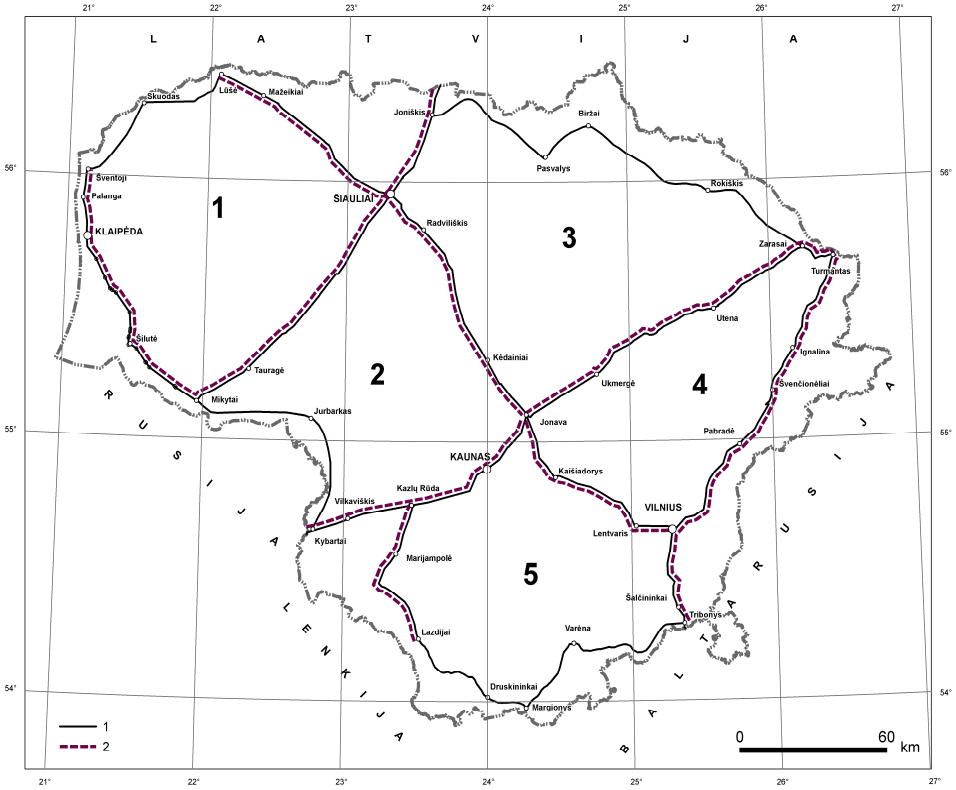
Atliekant tyrimus, taikyta antrajame darbo skyriuje pateikta metodika, atsižvelgiant į gautas trečiajame skyriuje atliktų tyrimų apibendrinimo rekomendacijas.

Skyriaus medžiaga publikuota autorės straipsniuose ir tarptautinių, respublikinių konferencijų medžiagose (2A, 8A).

4.1. Išmatuoti Žemės plutos judesiai ir jų savybių kaitos kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose tyrimas

Šiaurės rytų Lietuvos dalyje esančių kartotinių niveliacijų linijų *Vilnius–Jonava, Jonava–Zarasai–Turmantas, Turmantas–Vilnius* (4.1 pav.) savybių kaitos einant laikui analizė atlikta trečiajame darbo skyriuje. Norėdami įsitikinti, ar ir kituose Lietuvos regionuose yra tokie patys judesių kaitos einant laikui ypatumai, atliksime kitų trečiajame skyriuje nenagrinėtų linijų analizę.

Vertikaliųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje savybėms nustatyti remtasi kartotinių niveliacijų 5 poligonuose (4.1 pav.) 2006–1931/33 m. laikotarpiu atliktų tiksliųjų niveliacijų duomenimis. Pasirinktas tirti paskutinių 75 metų laikotarpis, nes Lietuvos teritorijoje patikimi niveliacijos matavimų duomenys su išlikusiu nemažu kartotinai kelis kartus niveliuotų reperių skaičiumi prasideda nuo 1931/33 metų.



Sutartiniai žymėjimai: 1 – vertikaliojo tinklo niveliacijos linijos, 2 – kartotinės niveliacijos linijos.

4.1 pav. *Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo schema*

Pagal geodezinius matavimus nustatytų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai, norint eliminuoti atsitiktinius trikdžius, glotninami regresiniais modeliais (2.4). Poligonų linijų skirtingų laiko tarpų matavimo rezultatų analizė atlikta pagal (2.1 poskyris) pateiktą metodiką. Išmatuoti vertikalieji Žemės plutos judesiai glotninami tiesiniais ir antrosios eilės daugianariais regresiniais modeliais. Glotninimo regresiniai modeliai ir statistinis jų įvertinimas kartotinių niveliacijų linijose pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių kartotinių niveliacijų linijose regresiniai modeliai*

Eil. Nr.	Laikotarpis, metai	Modelio tipas	Regresinis modelis	$R^2\,\%$	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q=0{,}05$
Jonava–Šiauliai–Joniškis						
1	1970/71–1948	tiesinis	$V = 0{,}564543 - 0{,}016863\ S$	85,03	170,43	4,17
2	1970/71–1948	daugianaris	$V = -0{,}204672 + 0{,}03216\ S - 0{,}00066725\ S^2 + 0{,}00000237832\ S^3$	95,33	190,39	2,95
3	2002/04–1948	tiesinis	$V = 0{,}0743887 - 0{,}0023396\ S$	23,09	7,51	4,24
4	2002/04–1948	daugianaris	$V = -0{,}174577 + 0{,}0204269\ S - 0{,}000356244\ S^2 + 0{,}00000136192\ S^3$	57,19	10,24	3,03
5	2002/04–1970/71	tiesinis	$V = -0{,}183144 + 0{,}00665005\ S$	72,19	51,92	4,35
6	2002/04–1970/71	daugianaris	$V = -0{,}0778638 + 0{,}00291378\ S + 0{,}0000204204\ S^2$	74,10	27,18	3,52
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai						
7	1954–1934/37/48	tiesinis	$V = -0{,}30902 + 0{,}0615655 \cdot S$	82,35	200,69	4,08
8	1954–1934/37/48	daugianaris	$V = -0{,}738456 + 0{,}0796258 \cdot S - 0{,}000136484 \cdot S^2$	82,69	100,33	3,22
9	1998–1934/37/48	daugianaris	$V = 0{,}188944 - 0{,}0084696 \cdot S + 0{,}0000688292 \cdot S^2$	49,10	9,65	3,49
10	1970–1954	tiesinis	$V = -0{,}190865 - 0{,}0187552 \cdot S$	90,98	262,10	4,23
11	1970–1954	daugianaris	$V = -0{,}0537555 - 0{,}0240307 \cdot S + 0{,}0000361515 \cdot S^2$	91,38	132,55	3,39
12	1998–1954	tiesinis	$V = 0{,}0710227 - 0{,}00505238 \cdot S$	85,52	224,37	4,07
13	1998–1954	daugianaris	$V = 0{,}10335 - 0{,}00628566 \cdot S + 0{,}00000863554 \cdot S^2$	85,74	111,23	3,25
14	1998–1970	tiesinis	$V = 0{,}0527707 + 0{,}00164166 \cdot S$	57,22	26,75	4,35
15	1998–1970	daugianaris	$V = -0{,}00368191 + 0{,}00422067 \cdot S - 0{,}0000189274 \cdot S^2$	66,04	18,47	3,52
Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena						
16	1998–1982	tiesinis	$V = 0{,}0624196 - 0{,}03314 \cdot S$	94,69	321,07	4,41
17	1998–1982	daugianaris	$V = -0{,}0394281 - 0{,}0217326 \cdot S - 0{,}000170347 \cdot S^2$	95,55	182,42	3,59
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė						
18	1965–1931/33	tiesinis	$V = 0{,}000958675 + 0{,}00834549 \cdot S$	58,02	23,50	4,45
19	1965–1931/33	daugianaris	$V = 0{,}04891 + 0{,}00397327 \cdot S + 0{,}000069257 \cdot S^2$	59,72	11,86	3,63
20	2004–1931/33	tiesinis	$V = 0{,}343873 + 0{,}0100613 \cdot S$	75,47	33,83	4,84

4.1 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Laikotarpis, metai	Modelio tipas	Regresinis modelis	R^2 %	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q = 0{,}05$
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė						
21	2004–1931/33	daugianaris	V = 0,213681 + 0,0180329·S-0,0000842016·S^2	79,51	19,41	4,10
22	2004–1965	daugianaris	V = 0,287434 + 0,0339171·S-0,000373093·S^2	60,28	9,87	3,81
Šiauliai–Tauragė–Mikytai						
23	1976–1931/32/33/48	tiesinis	V = 0,489467 – 0,0115183·S	66,33	74,87	4,09
24	1976–1931/32/33/48	daugianaris	V = 0,0404199 + 0,00407821·S-0,0000991463·S^2	71,51	46,42	3,25
25	2002–1931/32/33/48	tiesinis	V = 0,138108 – 0,00501775·S	82,28	55,74	4,75
26	2002–1931/32/33/48	daugianaris	V = -0,0168849 + 0,000526973·S-0,000037426·S^2	91,58	59,84	3,98
27	2002–1976	daugianaris	V = -0,0450386-0,0165206·S+0,000102786·S^2	58,15	15,98	3,42
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė						
28	1954–1936	tiesinis	V = -0,137681 + 0,006127·S	63,95	53,20	4,17
29	1954–1936	daugianaris	V = -0,0301781-0,0000347949·S+0,0000577806·S^2	69,32	32,77	3,33
30	1963/64–1954	daugianaris	V = -0,139187 + 0,0433267·S-0,000532809·S^2	74,40	53,76	3,25
31	1975–1963/64	tiesinis	V = 0,136947 + 0,00933873·S	59,58	45,69	4,16
32	1973/75–1963/64	daugianaris	V = 0,19392 + 0,00467324·S + 0,0000621174·S^2	61,29	23,75	3,32
33	1963/64–1936	daugianaris	V= -0,0612952 + 0,0147386·S-0,00011835·S^2	57,51	20,98	3,30
34	1973/75–1936	tiesinis	V = 0,1255 + 0,00584052·S	61,59	28,87	4,41
35	1973/75–1936	daugianaris	V = 0,00303181 + 0,0152157·S-0,000119059·S^2	80,13	34,28	3,59
36	1973/75–1954	daugianaris	V = 0,065775 + 0,0276554·S-0,000311967·S^2	83,81	56,93	3,44
37	2003–1936	tiesinis	V = 0,0773986 + 0,00848697·S	83,82	51,78	4,96
38	2003–1936	daugianaris	V = -0,0649324 + 0,0182901·S-0,0000841745·S^2	90,64	43,60	4,26
39	2003–1954	tiesinis	V = 0,167115 + 0,0104432·S	78,65	47,88	4,67
40	2003–1954	daugianaris	V = -0,0567473 + 0,0238272·S-0,000113555·S2	89,25	49,81	3,89
41	2003–1963/64	tiesinis	V = 0,118361 + 0,0126464·S	88,80	126,82	4,50
42	2003–1963/64	daugianaris	V = -0,0106735 + 0,0199354·S-0,0000618943·S^2	91,01	75,90	3,68
43	2003–1973/75	tiesinis	V = 0,150331 + 0,0181196·S	83,31	84,87	4,45
44	2003–1973/75	daugianaris	V = -0,00891926 + 0,0303963·S-0,000162982·S^2	86,96	53,35	3,63

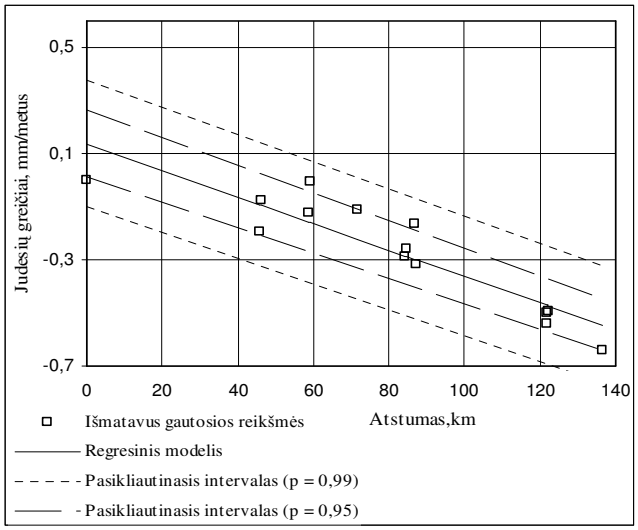
Hipotezė, kad glotninimo modelis adekvatus matavimo duomenims, t. y., kad kokybiškas modelis su tikimybe $p \geq 1-q$ imamas tuomet, kai statistika $F \geq F_{q(k_1k_2)}$. Patikimumo lygmuo imtas $q = 0{,}05$. Regresinio modelio laipsnis didinamas tol, kol gerėja determinacijos koeficientas R^2 reikšmė, t. y. kol šio

rodiklio didėjimas reikšmingas.

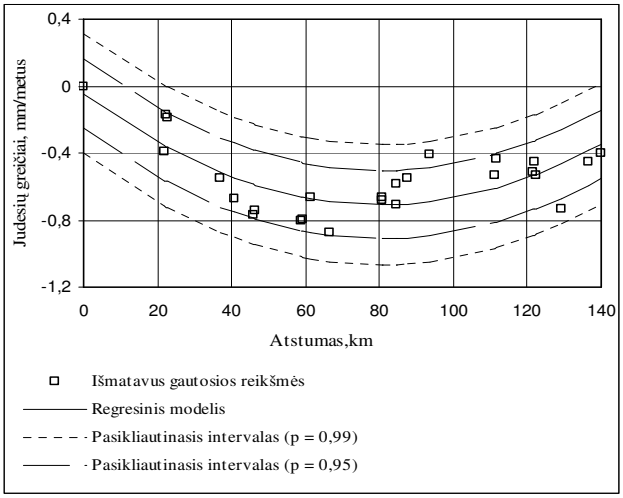
4.1 lentelėje pateikti tie regresiniai modeliai, kurie atitinka abi pirmiau minėtas sąlygas.

Iš 4.1 lentelės duomenų matyti, kad daugumoje nagrinėtų linijų iš laiko tarpų tarp kartotinių niveliacijų Lietuvos teritorijoje pakankamai adekvačiai (su tikimybe $p \geq 0{,}95$) bendruosius vertikaliųjų judesių greičius išreiškia pirmosios eilės (tiesiniai) modeliai. Aukštesniojo laipsnio modeliai pagal determinacijos koeficientų reikšmę didesnius skirtumus nuo tiesinių modelių turi tik kai kuriems laiko tarpams tarp kartotinių niveliacijų *Jonava–Šiauliai–Joniškis* (2002/04–1948 m.), *Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai* (1998–1934/37/48), *Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė* (2004–1965), *Šiauliai–Tauragė–Mikytai* (2002–1976), *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė* (1963/64–1954, 1963/64–1936 ir 1973/75–1954).

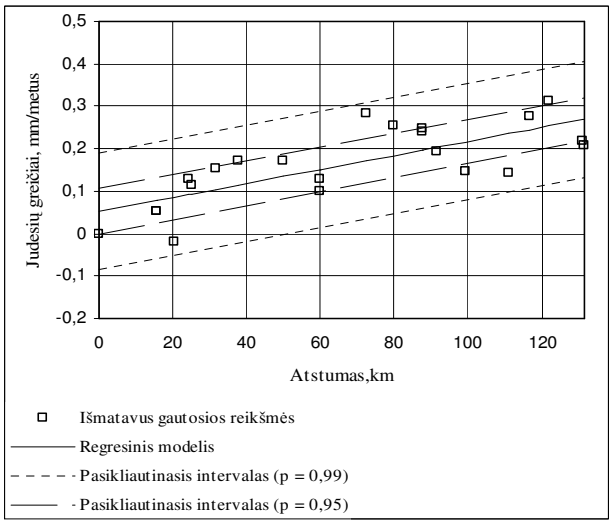
Niveliacijos linijų matavimų rezultatai, tiesiniai ir antrosios eilės daugianariai regresijos modeliai (2.4) ir jų pasikliautinieji intervalai (2.17) su tikimybėmis $p = 0{,}95$ ir $p = 0{,}99$ būdingiausiais skirtingų vertikaliųjų judesių savybių laikotarpiais grafiškai atvaizduoti 4.2–4.7 paveiksluose.



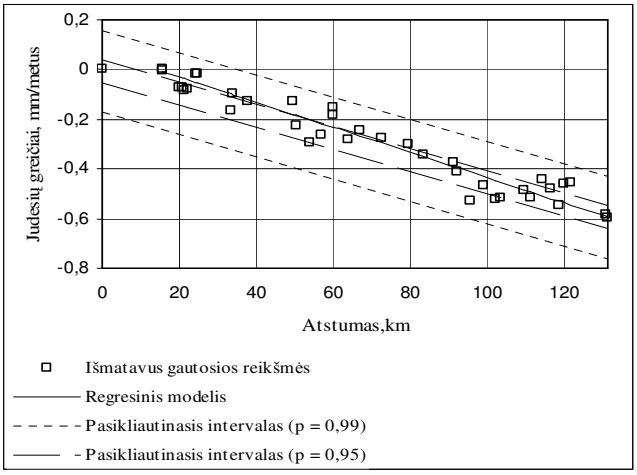
4.2 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 2002–1931/32/33/48 m. Šiauliai–Tauragė–Mikytai linijoje (tiesinis modelis)*



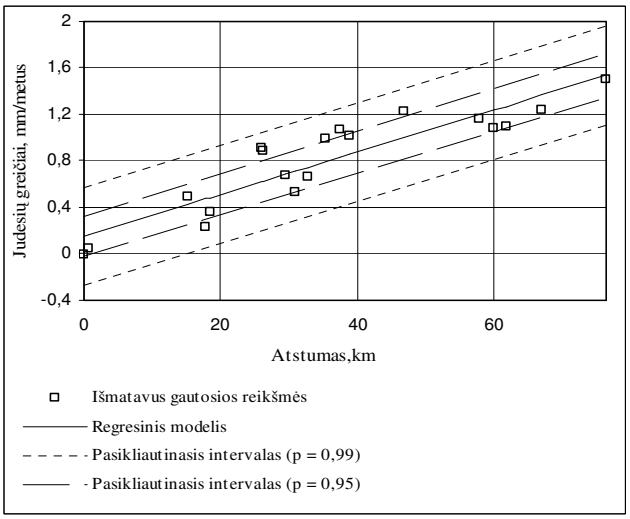
4.3 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 2002–1976 m. Šiauliai–Tauragė–Mikytai linijoje (antros eilės daugianaris modelis)*



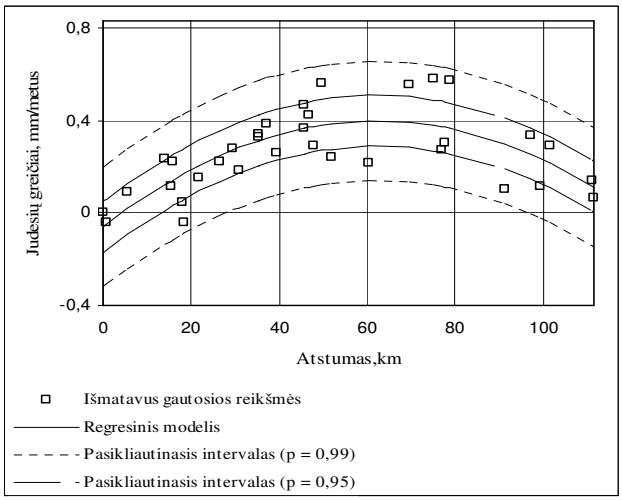
4.4 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1998–1970 m. Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai linijoje (tiesinis modelis)*



4.5 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1998–1954 m. Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai linijoje (tiesinis modelis)*



4.6 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 2003–1973/75 m. Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė linijoje (tiesinis modelis)*



4.7 pav. *Žemės paviršiaus judesiai 1963/64–1936 m. Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė linijoje (antros eilės daugianaris modelis)*

Iš pateiktų 4.2–4.7 pav. matyti, kad atskirais laiko tarpais, kaip ir šiaurės rytų Lietuvos dalyje, einant laikui atsiranda judesių inversijos požymių. Linijoje *Šiauliai–Tauragė–Mikytai* 2002–1931/32/33/48 m. – vertikaliųjų judesių kryptis yra viena, o 2002–1976 m. – kita, nors vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių kaitos amplitudė yra panaši (apie – 0,74 mm/m.), taip pat linijoje *Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai* tarp matavimo ciklų 1998–1970 m. ir 1998–1954 m. bei linijoje *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė* 2003–1973 m. vertikaliųjų Žemės plutos judesių kryptis yra viena, 1963/64–1936 m. – kita.

Hipotezei apie galimą vertikaliųjų Žemės plutos judesių savybių kaitą patikrinti atlikta išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių glotninimo regresinių modelių gradientų analizė, taikant 2.4 poskyryje pateiktą metodiką ((2.26)–(2.29) formules). Atsižvelgiant į tai, kad ne visose linijose bei ne visiems laiko tarpams tarp kartotinių niveliacijų tinkamiausias išmatuotųjų vertikaliųjų Žemės plutos judesių glotninimo modelis yra tiesinis, analizuojant greičių gradientų modelius atskirais atvejais tenka palyginti tarpusavyje tiesinius ir netiesinius modelius, t. y. pirmojo ir antrojo laipsnio daugianarius gradientus. Antrojo laipsnio daugianariu suglotninti greičių gradientai bus $grad(v) = \beta_1 + 2\beta_2 S$, o pirmojo laipsnio $grad(v) = \beta_1$.

4.2 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių tiesinių modelių gradientų analizė*

Laiko tarpas, metais	$grad(v)$	$\sigma(grad\,v)$	Statistika t	Patikimumo lygmuo q
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai				
1954–1934/37/48	0,0616	0,0043	14,2	$q < 0{,}01$
1970–1954	–0,0188	0,0012	–16,2	$q < 0{,}01$
1998–1954	–0,0051	0,0003	–15,0	$q < 0{,}01$
1998–1970	0,0016	0,0003	5,2	$q < 0{,}01$
Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena				
1998–1982	–0,0331	0,0018	–17,9	$q < 0{,}01$
Šiauliai - Kužiai - Mažeikiai - Lūšė				
1965–1931/33	0,0083	0,0017	4,8	$q < 0{,}01$
2004–1931/33	0,0101	0,0017	5,8	$q < 0{,}01$
2004–1965	0,0066	0,0032	2,1	$q < 0{,}01$
Šiauliai–Tauragė–Mikytai				
1976–1931/32/33/48	–0,0115	0,0013	–8,7	$q < 0{,}01$
2002–1931/32/33/48	–0,0050	0,0007	–7,5	$q < 0{,}01$
2002–1976	–0,0169	0,0027	–6,32	$q < 0{,}01$
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė				
1954–1936	0,0061	0,0008	7,3	$q < 0{,}01$
1973/75–1963/64	0,0093	0,0014	6,8	$q < 0{,}01$
1963/64–1936	0,0147	0,0023	6,4	$q < 0{,}01$
1973/75–1936	0,0058	0,0011	5,4	$q < 0{,}01$
2003–1936	0,0085	0,0012	7,2	$q < 0{,}01$
2003–1954	0,0104	0,0015	6,9	$q < 0{,}01$
2003–1963/64	0,0126	0,0011	11,3	$q < 0{,}01$
2003–1973/75	0,0181	0,0020	9,2	$q < 0{,}01$
Jonava–Šiauliai–Joniškis				
1970/71–1948	–0,0169	0,0013	13,1	$q < 0{,}01$
2002/2004–1948	–0,0023	0,0008	2,7	$q < 0{,}01$
2002/2004–1970/71	0,0066	0,0009	7,2	$q < 0{,}01$

4.3 lentelė. *Regresinių modelių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių gradientų skirtumų analizė*

Laiko tarpas, metai	Δ	$\sigma(\Delta)$	t	$t_{q,k}$, $(q = 0{,}05)$	Pastabos
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai					
1998–1970 1998–1954	0,0067	0,0004	16,75	1,66	$t > t_q$
Šiauliai–Tauragė–Mikytai					
2002–1976 2002–1931/32/33/48	–0,0119	0,0028	4,25	1,69	$t > t_q$
Jonava–Šiauliai–Joniškis					
1970/71–1948 2002/2004–1970/71	–0,0235	0,0016	14,69	1,68	$t > t_q$

Iš 4.2 lentelėje pateiktų duomenų analizės matyti, kad atskirais laiko tarpais tose pačiose kartotinių niveliacijų linijose keičiasi ne tik išmatuotų Žemės plutos judesių kryptis, bet ir judesių gradientai. Todėl galima teigti, kad ir kituose Lietuvos teritorijos regionuose vertikaliųjų Žemės plutos judesių kaita pasireiškia panašiai kaip ir Šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje. Norint sudaryti vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį reikia sieti su konkrečiu periodu tarp kartotinių niveliacijų. Tolesniuose tyrimuose tokiu periodu imamas laikotarpis tarp paskutinės Lietuvos vertikaliojo geodezinio tinklo niveliacijos 1998–2006 metais ir prieš tai buvusios niveliacijos t. y. linijoje *Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai* (1998–1970 m.), linijoje *Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena* (1998–1982 m.), linijoje *Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai– Lūšė* (2004–1965 m.), linijoje *Šiauliai–Tauragė–Mikytai* (2002–1976 m.), linijoje *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė* (2003–1973/75 m.), *Jonava–Šiauliai–Joniškis* (2002/2004–1970/71 m.) laikotarpius. Niveliacijų tikslumas yra 0,37–0,63 mm/km. Skirtingais laikotarpiais atliktų niveliacijų charakteristikos pateiktos 1.1 lentelėje (1.4 poskyris).

4.2. Išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajų kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose analizė

Geologinės struktūros atžvilgiu Lietuvos teritorija yra vakarinėje Rytų Europos prekambrinės platformos dalyje. Geologinių sistemų storis įvairiuose Lietuvos rajonuose nevienodas, kaip ir jų susidarymo trukmė. Pilniausias ir storiausias geologinių sistemų pjūvis yra vakarinėje Lietuvos dalyje, ploniausia nuosėdų danga yra pietryčių Lietuvoje. Nuosėdinės dangos storis kinta nuo 200 m pietrytinėje iki 2 km vakarinėje Lietuvos dalyje (Grigelis, Kadūnas 1994). Žemės paviršiaus reljefas kinta nuo 0 m Baltijos jūros pakrantėje iki beveik 300 m pietryčiuose. Tad nustatant sąsajas geodeziniais metodais išmatuotų dabartinių Žemės plutos judesių su teritorijos georodikliais bei kitus tyrimus reikia atlikti regioniniu principu. Tą įtikinamai įrodė atlikti tyrimai šiaurės rytų Lietuvos dalyje (3.2 poskyris).

Nustatant vertikaliųjų Žemės plutos judesių sąsajas su teritorijos georodikliais, imami šie teritoriją apibūdinantys rodikliai, su kuriais ieškoma dabartinių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių v sąsajų:

x_1 – gravitacinis laukas;
x_2 – magnetinis laukas;
x_3 –Žemės paviršiaus reljefas;
x_4 – kristalinio pamato reljefas;
x_5 – prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefas;
x_6 – kvartero dangos storis;

x_7 – nuosėdinės dangos storis;

x_8 – prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storis.

Georodiklių skaitmeninių modelių žemėlapiai pateikti 4.8–4.15 paveiksluose.

Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių bei georodiklių koreliacinės priklausomybės linijose bei jas sujungiant į poligonus (4.1 pav.) pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. *Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičių bei georodiklių koreliacija*

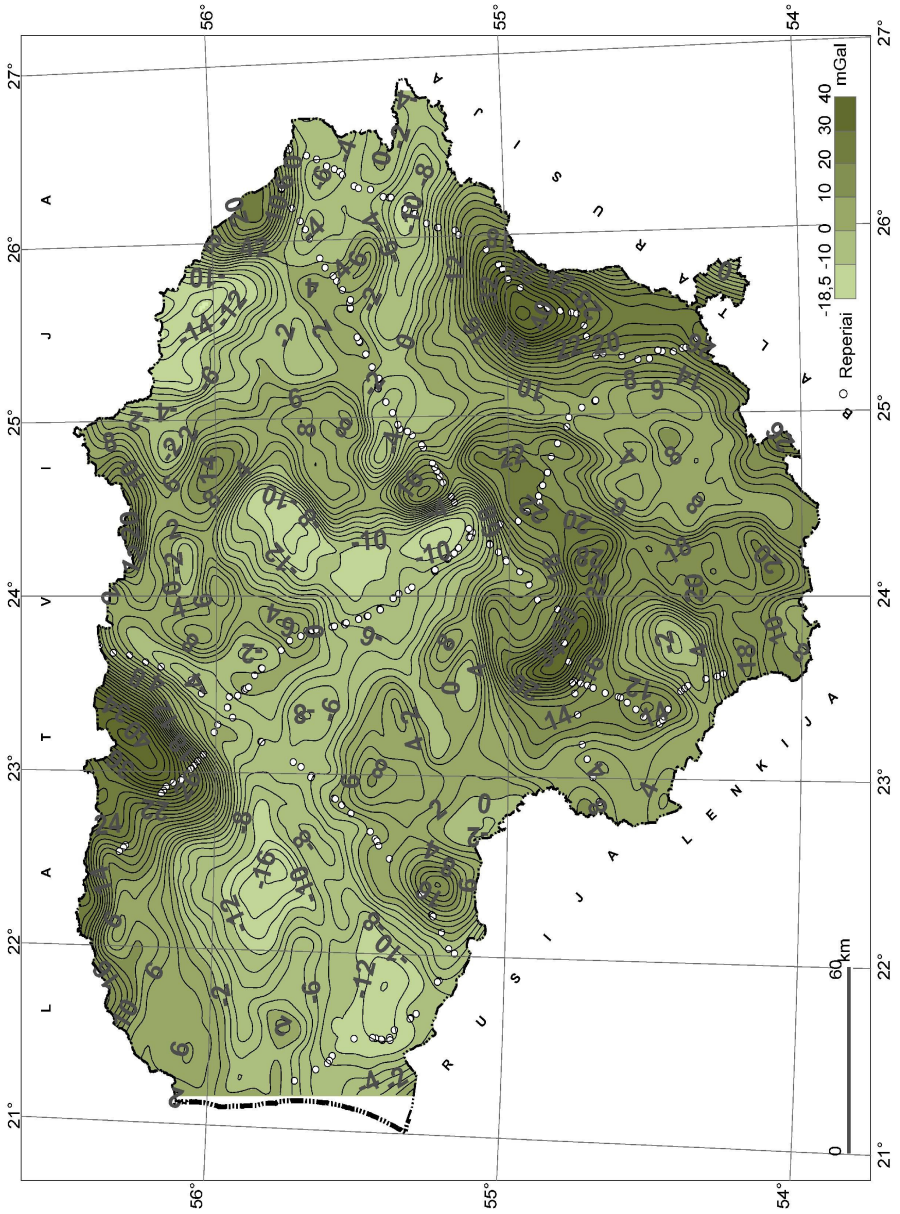
$r(vx_1)$	$r(vx_2)$	$r(vx_3)$	$r(vx_4)$	$r(vx_5)$	$r(vx_6)$	$r(vx_7)$	$r(vx_8)$
Linija/ Poligonas							
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė							
0,63	–0,14	–0,48	0,03	–0,46	–0,28	–0,14	–0,09
Šiauliai–Tauragė–Mikytai							
–0,12	–0,49	–0,13	0,24	0,22	–0,32	–0,38	–0,24
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė							
0,07	–0,70	–0,16	–0,41	–0,80	0,81	0,40	0,24
1 poligonas							
0,31	–0,46	–0,27	–0,08	–0,01	–0,47	0,04	0,08
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai							
0,59	0,52	–0,27	–0,57	–0,69	0,40	0,57	0,43
2 poligonas							
0,30	–0,41	–0,23	0,47	–0,09	–0,26	–0,48	–0,47
Jonava–Joniškis							
0,70	0,28	–0,19	–0,63	0,32	–0,69	0,57	0,62
3 poligonas							
0,50	0,33	0,74	0,53	0,68	0,50	–0,46	–0,48
Kazlų Rūda–Šeštoka–Lazdijai–Lenkijos siena							
0,87	0,53	–0,95	–0,75	–0,89	–0,88	0,53	0,68
5 poligonas							
0,33	0,23	–0,03	0,27	0,14	–0,20	–0,32	–0,29

Iš 4.4 lentelės duomenų matyti, kad linijoje *Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė* stipriausi vertikaliųjų Žemės plutos judesių koreliaciniai ryšiai yra su gravitaciniu lauku, Žemės paviršiaus reljefu, prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefu $-0{,}48 \le r \le 0{,}63$. Linijoje *Šiauliai–Tauragė–Mikytai* stipriausi koreliaciniai ryšiai su magnetiniu lauku $r = -0{,}49$. Linijoje *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė* stipriausi koreliaciniai ryšiai su magnetiniu lauku, prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefu bei kvartero dangos storiu $-0{,}80 \le r \le 0{,}81$. Sujungus šias tris linijas, stipriausi koreliaciniai ryšiai yra su gravitaciniu lauku ir kvartero dangos storiu $r = -0{,}47$. Linijoje *Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai* stipriausi vertikaliųjų Žemės plutos judesių koreliaciniai ryšiai yra su visais georodikliais, išskyrus Žemės paviršiaus reljefą ir kvartero dangos storį, kurių koreliacijos koeficientai $-0{,}27 \le r \le 0{,}40$. 2 poligone sujungus linijas: *Šiauliai–Tauragė–Mikytai, Jonava–Šiauliai, Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai* stipriausi koreliaciniai

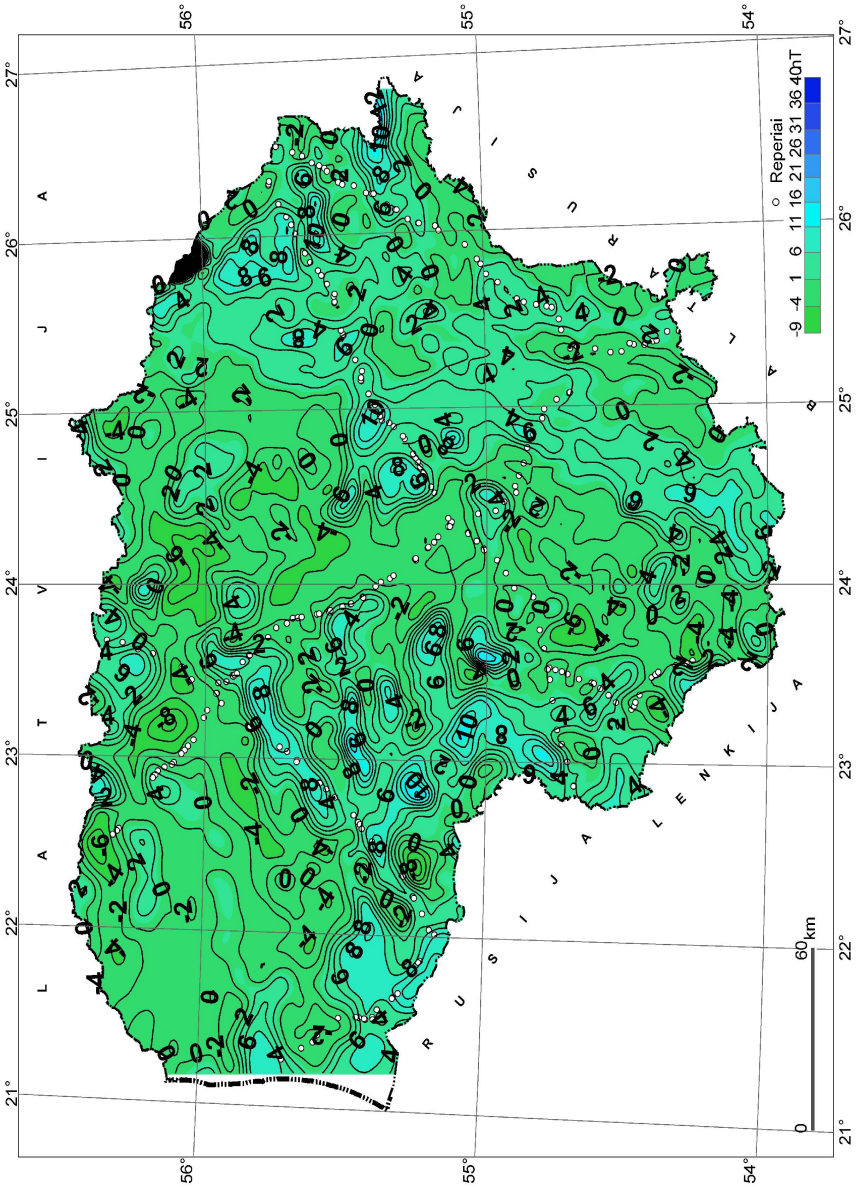
ryšiai yra su magnetiniu lauku, kristalinio pamato reljefu, nuosėdinės dangos storiu bei prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storiu. Linijoje *Jonava–Joniškis* stipriausi koreliaciniai ryšiai yra su gravitaciniu lauku, kristalinio pamato reljefu, kvartero dangos storiu, nuosėdinės dangos storiu, prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storiu $-0{,}69 \le R \le 0{,}70$. 3 poligone linijose: *Jonava–Šiauliai–Joniškis, Jonava–Zarasai* stipriausi koreliaciniai ryšiai yra su visais georodikliais, išskyrus magnetinį lauką, kurio koreliacijos koeficientas $r = 0{,}33$. Linijoje *Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena* stipriausi koreliaciniai ryšiai yra su visais georodikliais $-0{,}95 \le r \le 0{,}87$. 5 poligone sujungus linijas: *Vilnius–Jonava, Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda* bei *Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena* koreliaciniai ryšiai su visais georodikliais, lyginant su ankščiau paminėtais poligonais yra patys prasčiausi, maksimali koreliacijos koeficiento reikšmė yra apie $0{,}33$.

Kadangi kartotinių niveliacijų linijose bei poligonuose koreliacinės priklausomybės yra ne vienodos, todėl galima nustatyti pagal 3.2 poskyryje pateiktą metodiką koreliacijos koeficiento reikšmingumą. Vidutinis kartotinių niveliacijų reperių skaičius linijose yra apie 21. Esant $n = 21$, $q = 0{,}10$, gauname kritinę ribą $r \approx 0{,}29$.

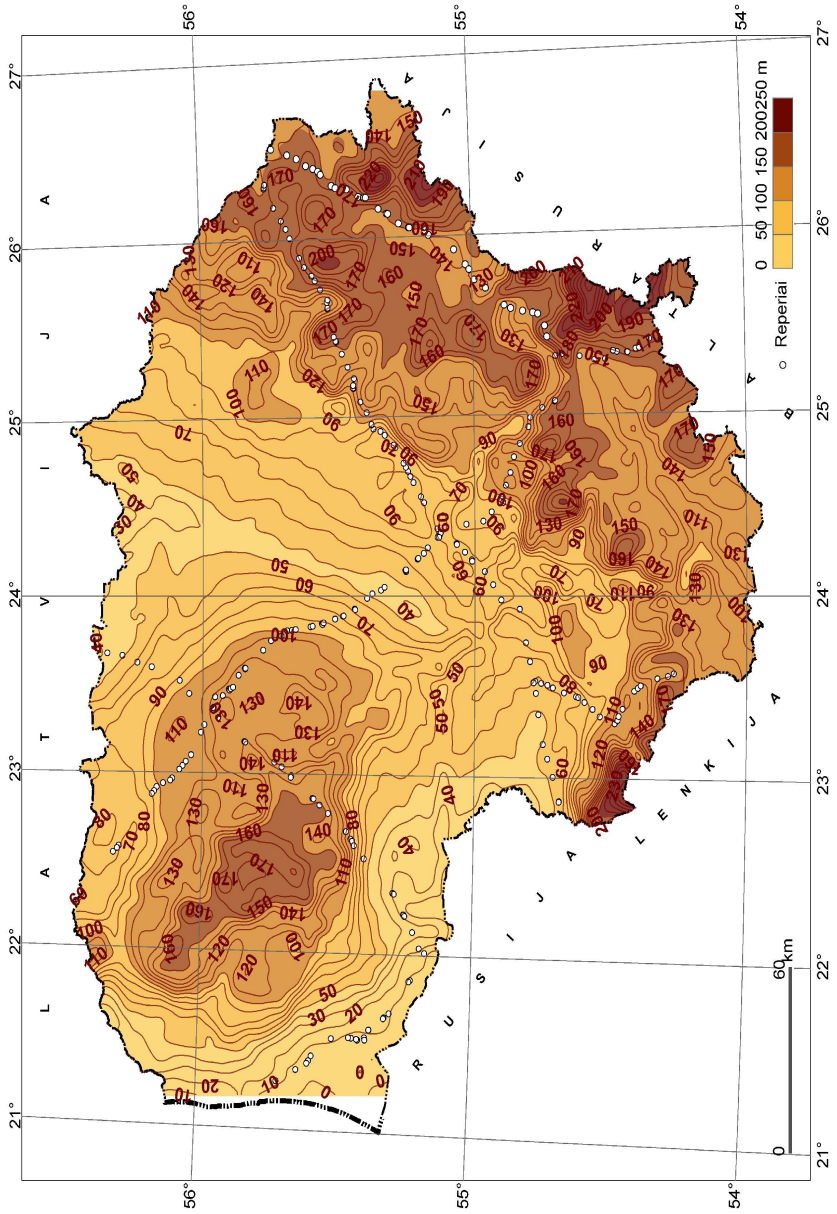
Atlikta koreliacinė analizė linijose ir jas sujungus į poligonus parodė, kad koreliacinių sąsajų sklaida susijusi su nagrinėjamų linijų teritorine padėtimi bei vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičiais. Tose linijose, kuriose greičiai ir jų kaita linijoje mažesnė, mažiau reikšmingi ir kai kurie vertikaliųjų judesių koreliacijos koeficientai su georodikliais (pvz. *Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė, Šiauliai–Tauragė–Mikytai*). Tai galima paaiškinti ne tik skirtinga geologine sandara, bet ir didesne matavimo paklaidų įtaka, nes esant mažesniems judesių greičiams didesnę įtaką turi matavimų paklaidos. Be to, šios linijos yra teritorijoje su stora nuosėdine danga (ypatingai linija *Šiauliai–Tauragė–Mikytai).* Tokiose teritorijose tektoninis Žemės plutos judesių atspindys Žemės paviršiuje gali būti labai paveiktas nuosėdinės dangos sluoksnių deformacijų.



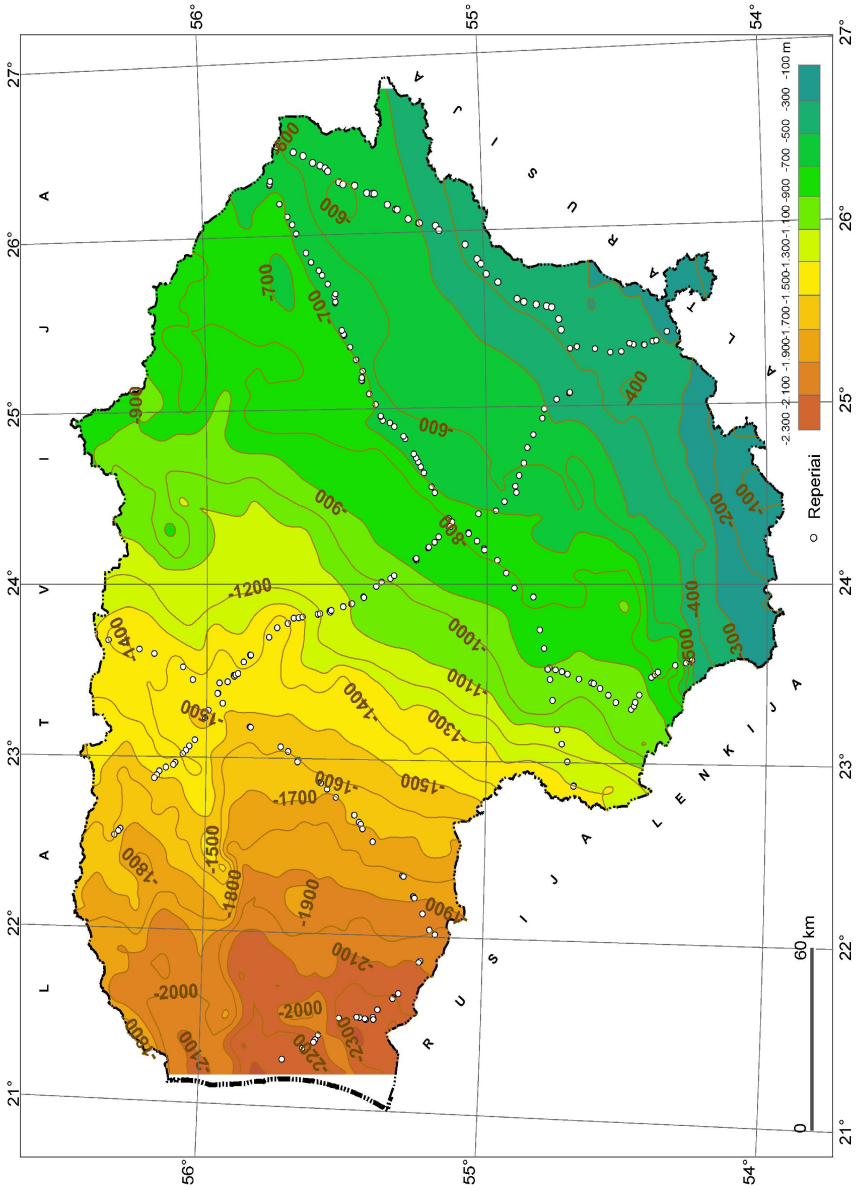
4.8 pav. *Gravitacinis laukas*



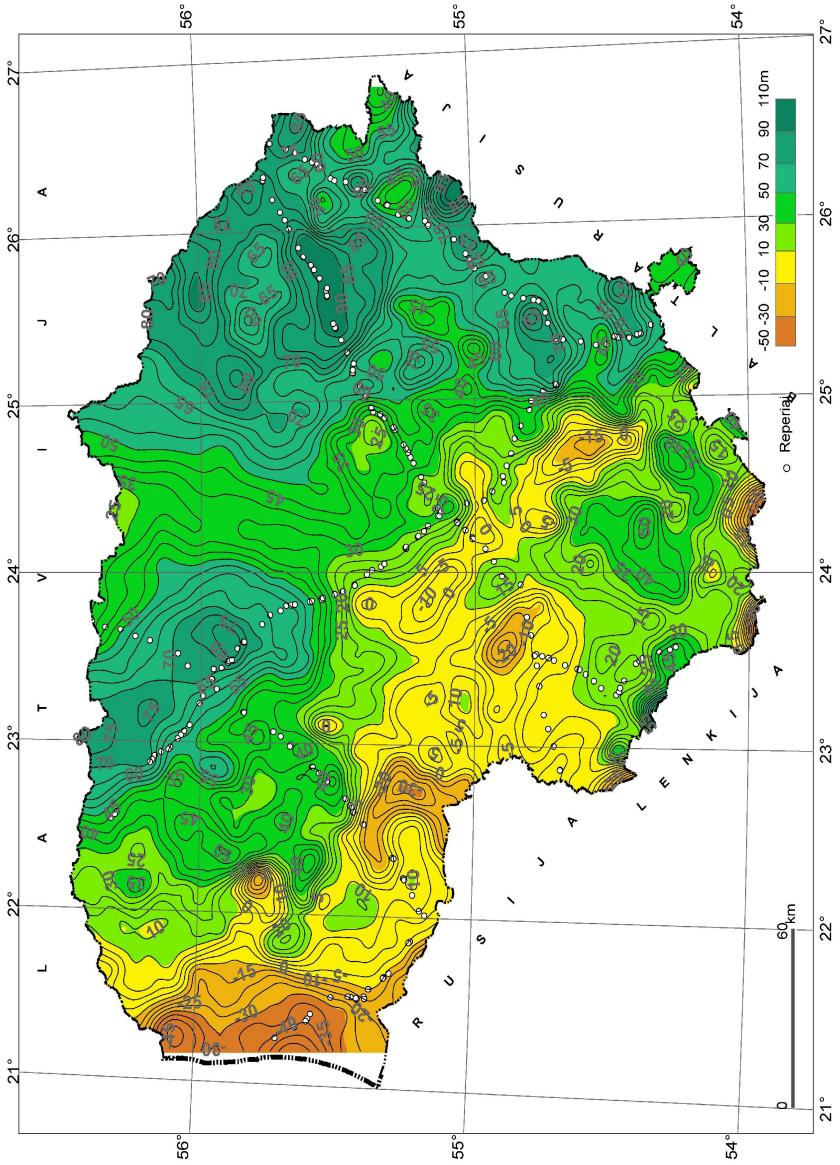
4.9 pav. *Magnetinis laukas*



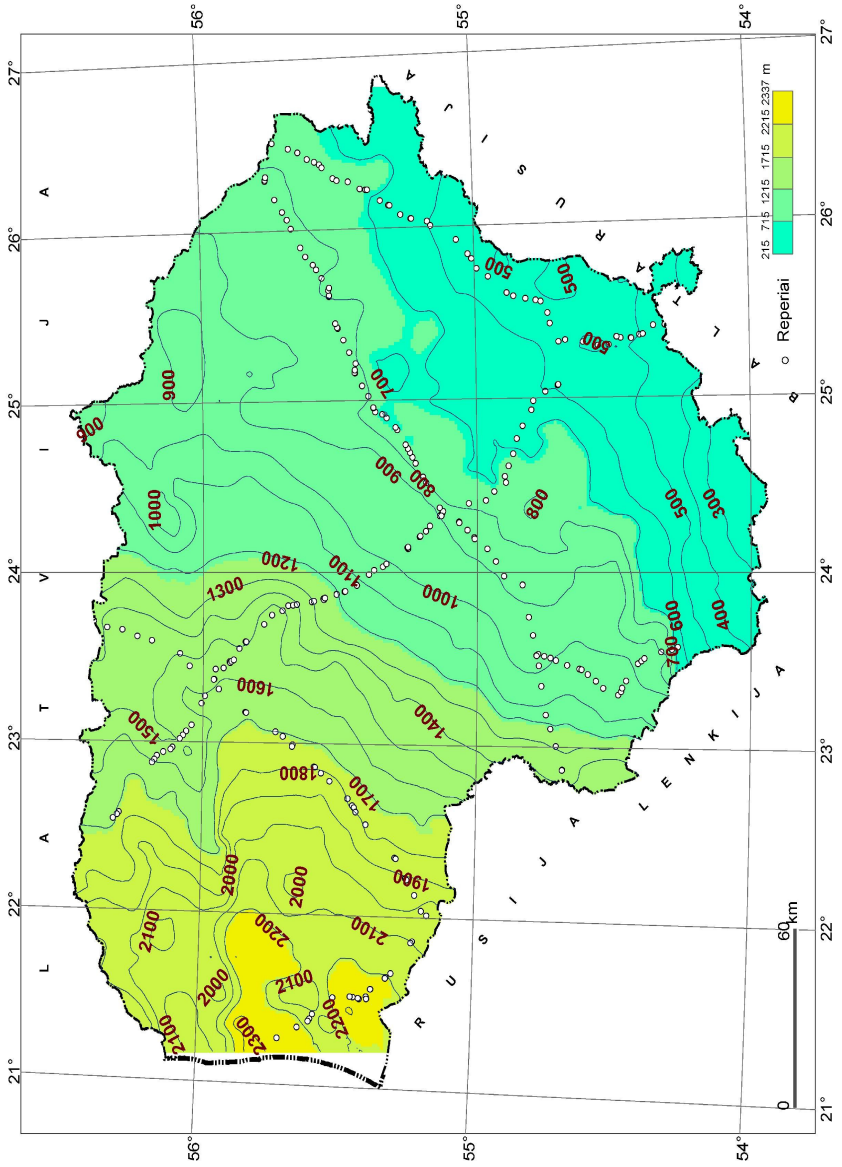
4.10 pav. *Žemės paviršiaus reljefas*



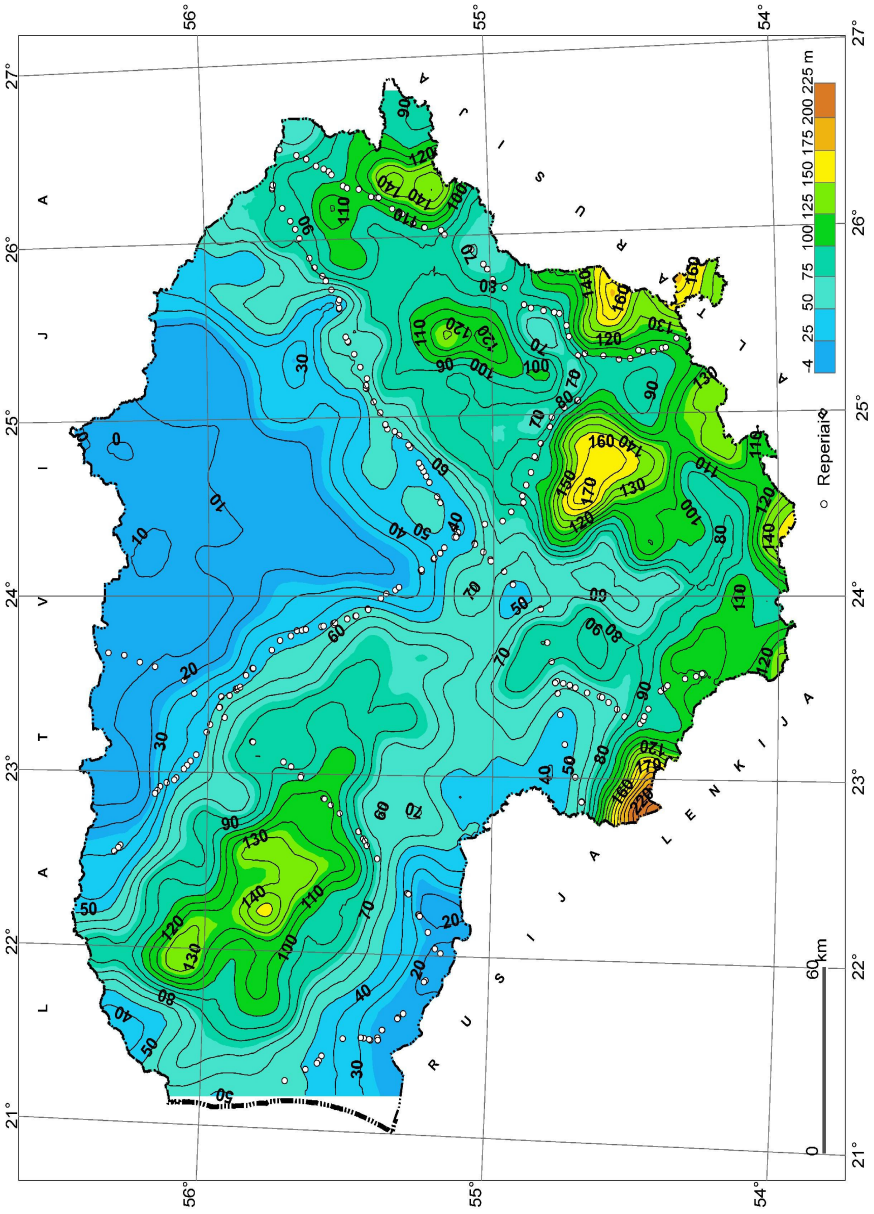
4.11 pav. *Kristalinio pamato reljefas*



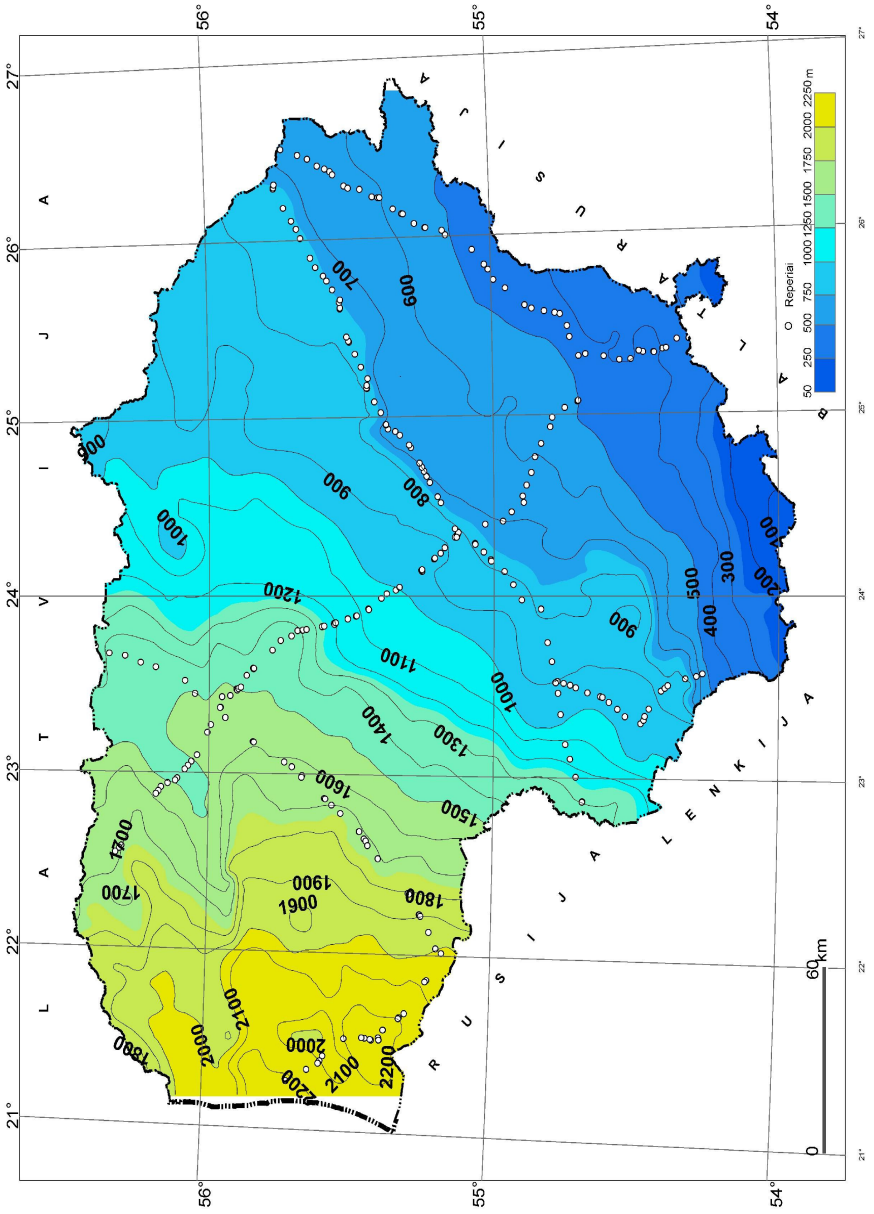
4.12 pav. *Prekvartero (pagrindinių sluoksnių) reljefas*



4.13 pav. *Nuosėdinės dangos storis*



4.14 pav. *Kvartero dangos storis*



4.15 pav. *Prekvartero (pagrindinių sluoksnių) storis*

4.3. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresiniai modeliai kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose

Iš ankstesnių tyrimų nustatyta (3.2 ir 4.2 poskyriai) (5A), kad koreliacinės priklausomybės tarp išmatuotų dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir georodiklių ne visur vienodos. Be to, yra tarpusavio koreliacinė priklausomybė tarp skirtingų georodiklių, kuri taip pat ne visur vienoda. Norint išsiaiškinti, kaip kinta šios priklausomybės Lietuvos teritorijoje, sudaryti regresiniai prognozavimo modeliai atskiroms linijoms pagal 2.3 poskyryje aprašytą metodiką. Regresiniai prognozavimo modeliai (4.1–4.18) sudaryti trimis būdais:

1) taikant visus koreliacinei analizei naudotus georodiklius;

2) atsižvelgiant tik į tuos teritoriją apibūdinančius rodiklius, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$;

3) taikant atvirkštinę žingsninę regresiją, kol regresijos lygtyje lieka 2–4 didžiausiąją įtaką turintys rodikliai, esant pakankamos tikimybės modelio adekvatumo rodikliams.

Prognozavimo regresiniai modeliai ir jų kokybės statistiniai rodikliai (determinacijos koeficientas $R^2\,\%$ (2.24), Fišerio statistika F (2.25) ir jos reikšmė F_q, esant patikimumo lygmeniui $q = 0{,}05$) pateikti 4.5 ir 4.6 lentelėse.

4.5 lentelė. *Regresinės analizės kartotinių niveliacijų linijose rezultatai*

Eil. Nr.	Analizės būdas	Georodikliai								$R^2,\%$	F	$F_{\substack{q(k_1,k_2)\\ q=0{,}05}}$
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
		Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė										
1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	86,04	5,39	3,73
2	2	×		×		×				76,42	12,97	3,49
3	3	×	×				×			63,67	7,01	3,49
Šiauliai–Tauragė–Mikytai												
4	1	×	×	×	×	×	×	×	×	73,55	6,26	2,51
5	2		×					×		27,74	4,61	3,40
6	3							×	×	64,18	21,50	3,40
Mikytai– Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė												
7	1	×	×	×	×	×	×	×	×	88,29	9,42	3,07
8	2	×			×		×			86,31	31,54	3,29
9	3		×			×	×			69,00	11,13	3,29
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai												
10	1	×	×	×	×	×	×	×	×	78,18	5,82	2,77
11	2	×	×		×	×		×	×	73,59	6,97	2,79
12	3	×			×					71,43	23,75	3,52
Jonava–Joniškis												
13	1	×	×	×	×	×	×	×	×	81,20	7,02	2,77
14	2	×			×		×	×	×	77,33	10,92	2,85
15	3				×		×			75,97	30,04	3,52

4.5 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Analizės būdas	Georodikliai								R^2,%	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q=0,05$
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena												
16	1	×	×	×	×	×	×	×	×	95,99	32,87	2,95
17	2	×	×	×	×	×	×	×	×	95,99	32,87	2,95
18	3	×				×	×			95,00	101,31	3,24

Sutartiniai žymėjimai: × *– regresinį modelį sudarantys georodikliai.*

Iš 4.5 lentelės duomenų galima teigti, kad modeliai su visais priežastiniais kintamaisiais, tik su tais kintamaisiais, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$ ir gautieji žingsninės regresijos būdu, yra statistiškai patikimi (tikimybė $p \geq 0{,}95$), nes visais atvejais $F > F_{q(k_1,k_2)}$, kai $q = 0{,}05$.

Regresijos modeliai su įvertintomis, naudojant išmatuotas reperių vertikaliųjų judesių greičių reikšmes ir skaitmenines georodiklių reikšmes ties reperiais, jų koeficientų reikšmėmis pateikti 4.6 lentelėje.

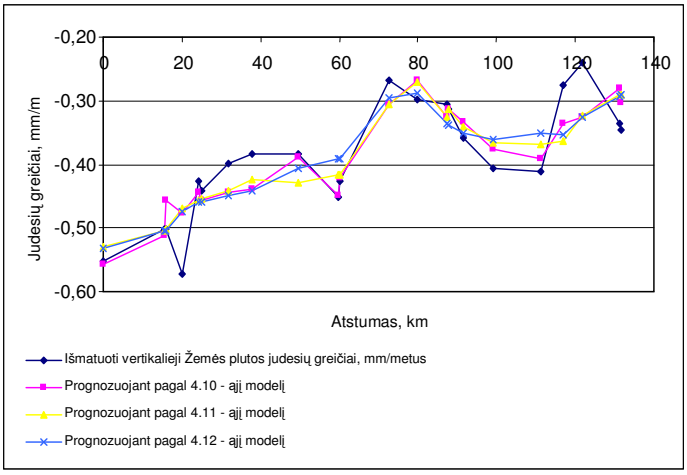
4.6 lentelė. *Regresijos modeliai kartotinių niveliacijų linijoms*

Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė		
1	1	$\hat{V} = -14{,}944 + 4{,}996 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}316 \cdot x_2 + 1{,}206 \cdot x_3 + + 3{,}616 \cdot x_4 - 4{,}769 \cdot x_5 - 1{,}690 \cdot x_6 + 0{,}490 \cdot x_7 + 3{,}133 \cdot x_8$ (4.1)
2	2	$\hat{V} = 1{,}203 + 1{,}582 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0{,}424 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 - 2{,}078 \cdot x_5$ (4.2)
3	3	$\hat{V} = 0{,}596 + 1{,}855 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}111 \cdot x_2 - 1{,}096 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.3)
Šiauliai–Tauragė–Mikytai		
4	1	$\hat{V} = 3{,}347 - 1{,}042 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0{,}514 \cdot x_2 + 0{,}395 \cdot x_3 + + 0{,}460 \cdot x_4 - 0{,}856 \cdot x_5 + 4{,}770 \cdot x_6 - 5{,}173 \cdot x_7 + 5{,}632 \cdot x_8$ (4.4)
5	2	$\hat{V} = 0{,}208 - 2{,}334 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 0{,}045 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (4.5)
6	3	$\hat{V} = 3{,}258 - 0{,}813 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 + 0{,}618 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.6)
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė		
7	1	$\hat{V} = -5{,}898 - 2{,}280 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}256 \cdot 10^{-2} x_2 - 5{,}654 \cdot x_3 - - 1{,}186 \cdot x_4 + 6{,}824 \cdot x_5 + 5{,}672 \cdot x_6 - 0{,}339 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 1{,}180 \cdot x_8$ (4.7)
8	2	$\hat{V} = -4{,}964 - 4{,}494 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}175 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 3{,}502 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.8)
9	3	$\hat{V} = -0{,}200 - 2{,}939 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 0{,}107 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + 2{,}424 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.9)

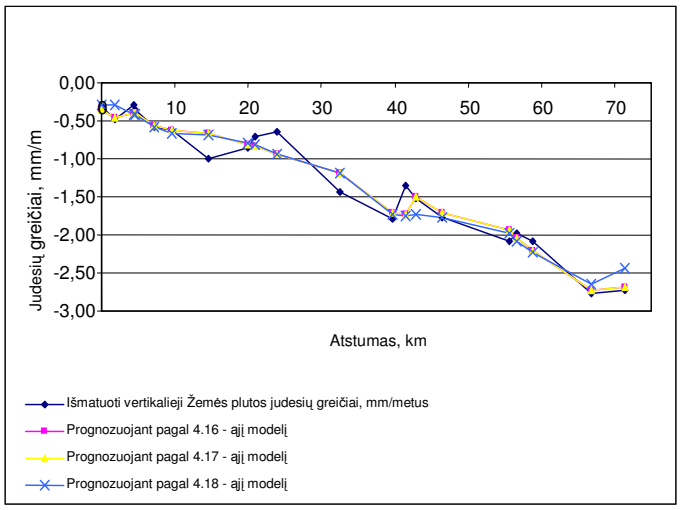
4.6 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
		Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai
10	1	$\hat{V} = -0{,}632 + 0{,}397 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 2{,}299 \cdot 10^{-2} x_2 - 0{,}212 \cdot x_3 +$ $+ 0{,}086 \cdot x_4 + 0{,}122 \cdot x_5 + 0{,}124 \cdot x_6 + 0{,}087 \cdot x_7 - 0{,}001 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.10)
11	2	$\hat{V} = -0{,}599 + 0{,}477 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}438 \cdot 10^{-2} x_2 - 0{,}242 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 -$ $- 0{,}171 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 0{,}206 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 0{,}004 \cdot x_8$ (4.11)
12	3	$\hat{V} = -0{,}732 + 0{,}558 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}030 \cdot 10^{-2} \cdot x_4$ (4.12)
		Jonava–Joniškis
13	1	$\hat{V} = -0{,}918 + 0{,}992 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 1{,}020 \cdot 10^{-2} x_2 - 0{,}291 \cdot x_3 -$ $- 0{,}287 \cdot x_4 + 0{,}575 \cdot x_5 + 0{,}307 \cdot x_6 - 3{,}141 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 0{,}254 \cdot x_8$ (4.13)
14	2	$\hat{V} = -0{,}983 + 0{,}689 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0{,}429 \cdot 10^{-2} x_4 + 0{,}017 \cdot x_6 -$ $- 0{,}031 \cdot x_7 + 0{,}028 \cdot x_8$ (4.14)
15	3	$\hat{V} = -0{,}946 - 0{,}107 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 1{,}581 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.15)
		Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena
16	1	$\hat{V} = -0{,}701 + 4{,}211 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 1{,}341 \cdot 10^{-2} x_2 + 1{,}491 \cdot x_3 + 4{,}779 \cdot x_4 -$ $- 6{,}295 \cdot x_5 - 2{,}250 \cdot x_6 + 0{,}742 \cdot x_7 + 4{,}037 \cdot x_8$ (4.16)
17	2	$\hat{V} = -0{,}701 + 4{,}211 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 1{,}341 \cdot 10^{-2} x_2 + 1{,}491 \cdot x_3 + 4{,}779 \cdot x_4 -$ $- 6{,}295 \cdot x_5 - 2{,}250 \cdot x_6 + 0{,}742 \cdot x_7 + 4{,}037 \cdot x_8$ (4.17)
18	3	$\hat{V} = -0{,}207 + 4{,}151 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 2{,}564 \cdot 10^{-2} x_5 - 1{,}668 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.18)

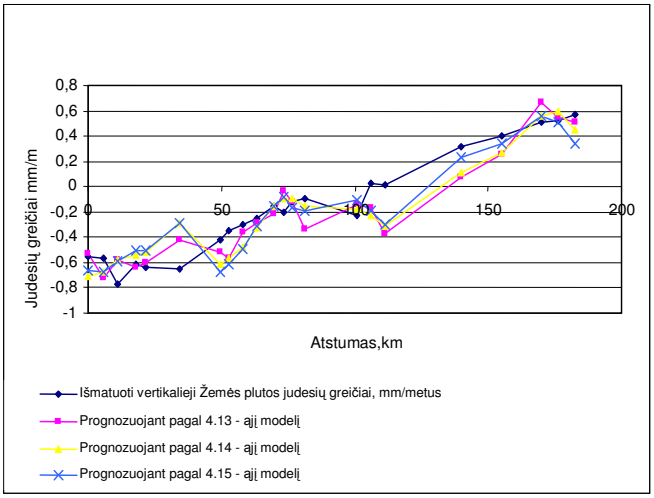
Linijoms gauti regresiniai modeliai (išmatuotos vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmės, prognozuojamos reikšmės pagal modelį su visais priežastiniais kintamaisiais, taip pat kurių koreliacijos koeficiento reikšmės su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$ ir atvirkštinės žingsninės regresijos būdu) grafiškai atvaizduoti 4.16–4.21 paveiksluose.



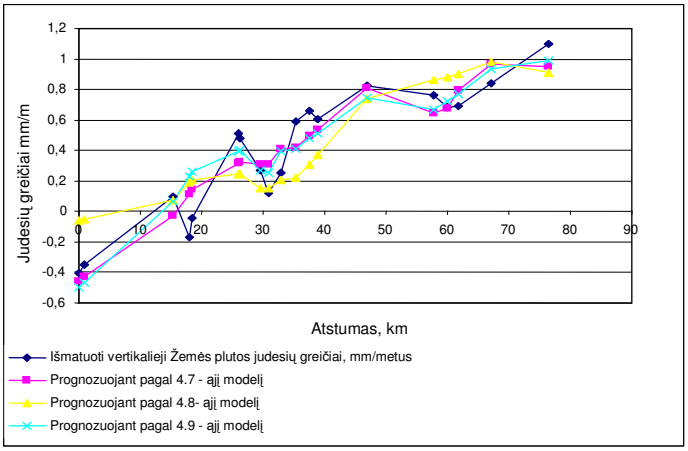
4.16 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Jonava – Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai grafikas (pagal 1998–1970 m. matavimo duomenis)*



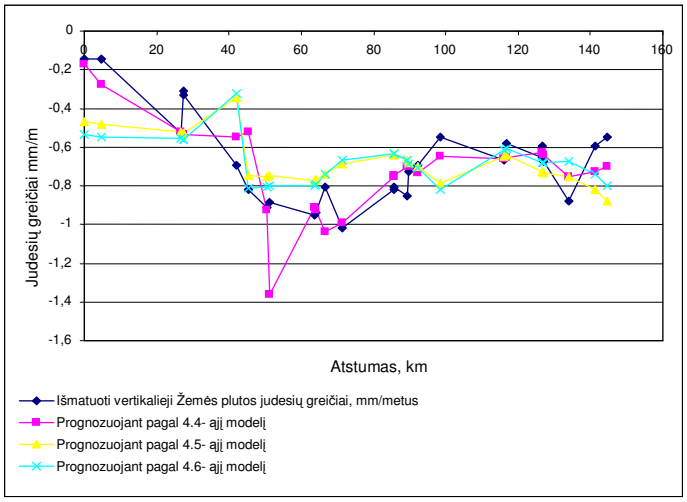
4.17 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena grafikas (pagal 1998–1982 m. matavimo duomenis)*



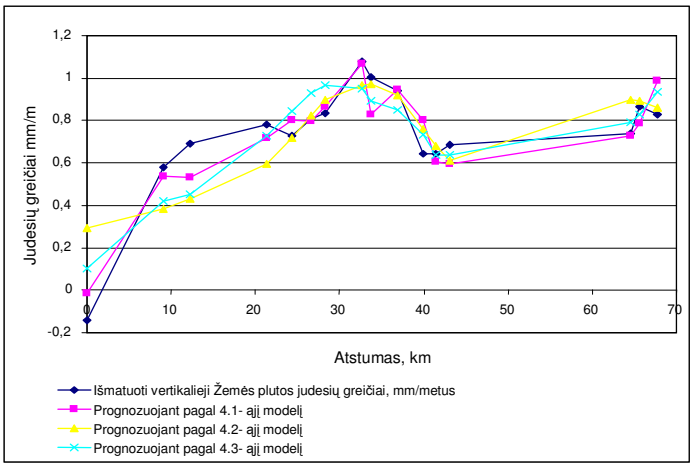
4.18 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Jonava–Joniškis grafikas (pagal 2002/04–1970 m. matavimo duomenis)*



4.19 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė grafikas (pagal 2003–1973 m. matavimo duomenis)*



4.20 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Šiauliai–Tauragė–Mikytai grafikas (pagal 2002–1976 m. matavimo duomenis)*



4.21 pav. *Išmatuotų ir prognozuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių linijoje Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė grafikas (pagal 2004–1965 m. matavimo duomenis)*

Remiantis 4.16–4.21 pav. analize galima teigti, kad atskirose linijose visi trys modeliai (su visais kintamaisiais, su tais kintamaisiais, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$ ir gautieji žingsninės regresijos būdu) gana gerai atvaizduoja bendruosius išmatuotų Žemės plutos judesių dėsningumus. Todėl šie būdai gali būti taikomi Žemės plutos judesių greičiams modeliuoti kartotinių niveliacijų linijose. Tačiau,

išnagrinėjus žingsninės regresijos būdu sudarytų modelių struktūrą, matoma, kad atskirose linijose ji yra skirtinga, t. y. modeliuose lieka kiti priežastiniai kintamieji. Todėl, norint prognozavimo modelius išplėsti į didesnes plotines teritorijas, sudarant vertikaliųjų judesių žemėlapį, rekomenduojama taikyti modelius su visais priežastiniais kintamaisiais.

Atsižvelgiant į gautuosius tyrimo rezultatus atskirose linijose ir įvertinant, kad ne visose teritorijos dalyse statistinės priklausomybės tarp išmatuotų dydžių tos pačios, sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį Lietuva buvo suskaidyta į penkis fragmentus, atitinkančius vertikaliojo geodezinio tinklo poligonus (4.1 pav.). Pagal tą pačią metodiką kaip ir linijose regresiniai prognozavimo modeliai sudaryti kiekvienam fragmentui, taip pat visai Lietuvos teritorijai sujungiant visus poligonus į vieną visumą. Regresiniai modeliai skaičiuoti trimis būdais:

1) taikant visus koreliacinei analizei naudotus georodiklius;

2) atsižvelgiant tik į tuos teritoriją apibūdinančius rodiklius, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$;

3) taikant atvirkštinę žingsninę regresiją, kol regresijos lygtyje lieka 2–4 didžiausią įtaką turintys rodikliai, esant pakankamos tikimybės modelio adekvatumo rodikliams.

Regresinės analizės kartotinių niveliacijų poligonuose statistiniai rodikliai pateikti 4.7 lentelėje, o regresiniai modeliai su įvertintomis koeficientų reikšmėmis – 4.8 lentelėje. Regresiniai modeliai grafiškai pateikti B priede.

4.7 lentelė. *Regresinės analizės kartotinių niveliacijų poligonuose rezultatai*

Eil. Nr.	Analizės būdas	Georodikliai								R^2,%	F	$F_{\substack{q(k_1,k_2)\\ q=0,05}}$
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
1 poligonas												
1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	61,78	10,91	2,06
2	2	×	×	×			×			48,64	13,73	2,50
3	3		×				×			45,43	24,98	3,15
2 poligonas												
4	1	×	×	×	×	×	×	×	×	44,91	5,20	2,01
5	2				×			×	×	24,06	5,91	2,71
6	3							×		22,84	17,17	4,01
3 poligonas												
7	1	×	×	×	×	×	×	×	×	78,66	17,97	2,17
8	2	×		×	×	×	×	×	×	78,62	21,02	2,25
9	3	×				×		×		76,23	47,02	2,79
5 poligonas												
10	1	×	×	×	×	×	×	×	×	57,11	8,99	2,03
11	2	×			×			×	×	37,65	8,75	2,50
12	3	×			×		×			51,38	20,78	2,74

4.7 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Analizės būdas	Georodikliai								R^2,%	F	$F_{q(k_1,k_2)}$ $q=0,05$
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
Visa Lietuva												
13	1	×	×	×	×	×	×	×	×	27,89	9,38	1,94
14	2					×				12,12	27,71	3,84
15	3	×				×	×			27,02	24,56	2,60

Sutartiniai žymėjimai: × – regresinį modelį sudarantys geologiniai rodikliai.

Iš 4.7 lentelės duomenų galima teigti, kad modeliai sudaryti trimis regresinės analizės būdais poligonuose yra statistiškai patikimi (tikimybė $p \geq 0,95$), nes visais atvejais $F > F_{q(k_1,k_2)}$, kai $q = 0,05$. Vertinant pagal determinacijos koeficiento reikšmę, geriausi yra regresiniai modeliai su visais priežastiniais kintamaisiais.

Bendro visos Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognozavimo regresinio modelio statistiniai kokybės rodikliai nepatikimi: determinacijos koeficientas $R^2 = 0,28$, o pagal kriterijų $F = 9,38$ modelio atitikties matavimų rezultatams tikimybė $p \geq 0,95$. Iš regresinio modelio analizės matyti, kad šis regresinis modelis teatspindi 28 % išmatuotų vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmių, o likę 72 % reikšmių yra ta dalis, kurios neatspindi regresinis modelis. Toks modelis vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapiui sudaryti netinkamas. Atsižvelgiant į gautuosius rezultatus, galima argumentuotai teigti, kad sudarant žemėlapį reikia taikyti fragmentinius su kartotinių niveliacijų poligonais sutampančius regresinius modelius, kurių statistiniai rodikliai rodo pakankamai gerą jų patikimumą ir atitiktį matavimų rezultatams.

4.8 lentelė. *Regresijos modeliai kartotinių niveliacijų poligonuose*

Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
1 poligonas		
1	1	$\hat{V} = -6,520 + 3,261 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0,110 \cdot x_2 + 7,104 \cdot x_3 -$ $- 5,008 \cdot x_4 - 2,084 \cdot x_5 - 3,021 \cdot x_6 - 4,083 \cdot x_7 - 0,922 \cdot x_8$ (4.19)
2	2	$\hat{V} = 0,699 + 1,296 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 8,034 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 0,483 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 -$ $- 0,464 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.20)
3	3	$\hat{V} = 0,748 - 8,099 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - 1,173 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.21)
2 poligonas		
4	1	$\hat{V} = -0,220 + 1,134 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 0,921 \cdot 10^{-2} x_2 - 0,441 \cdot x_3 +$ $+ 0,139 \cdot x_4 + 0,307 \cdot x_5 + 0,299 \cdot x_6 + 0,139 \cdot x_7 - 0,008 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.22)

4.8 lentelės tęsinys

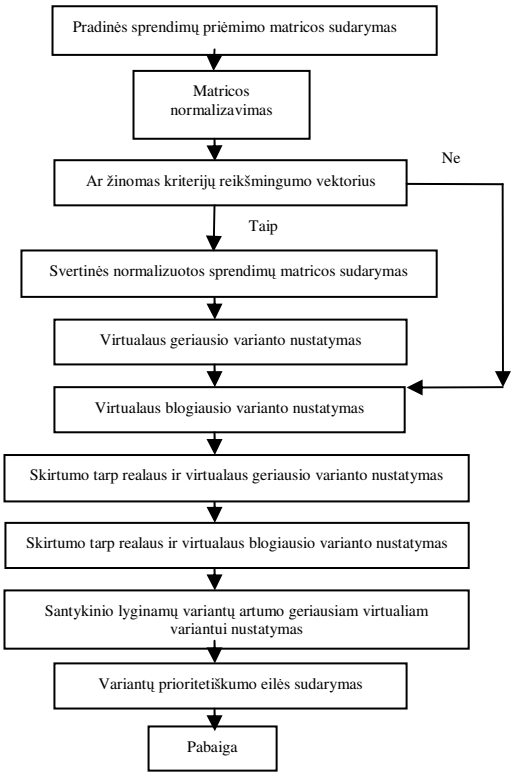
Eil. Nr.	Regresinės analizės žingsniai	Regresijos modeliai
		2 poligonas
5	2	$\hat{V} = -0{,}154 - 0{,}074 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 0{,}090 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 0{,}007 \cdot x_8$ (4.23)
6	3	$\hat{V} = -0{,}184 - 0{,}025 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (4.24)
		3 poligonas
7	1	$\hat{V} = 0{,}438 + 5{,}831 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0{,}764 \cdot 10^{-2} x_2 - 1{,}575 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 - - 1{,}017 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 5{,}489 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 1{,}482 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 3{,}762 \cdot 10^{-2} \cdot \cdot x_7 - 4{,}952 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.25)
8	2	$\hat{V} = 0{,}448 + 5{,}867 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}297 \cdot 10^{-2} x_3 - 1{,}803 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + + 6{,}015 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 1{,}687 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + 3{,}711 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 5{,}688 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.26)
9	3	$\hat{V} = 0{,}882 + 4{,}786 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 3{,}259 \cdot 10^{-2} x_5 - 0{,}195 \cdot 10^{-2} \cdot x_7$ (4.27)
		5 poligonas
10	1	$\hat{V} = 1{,}708 + 4{,}250 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 7{,}864 \cdot 10^{-2} x_2 - 0{,}153 \cdot x_3 + + 3{,}554 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 0{,}121 \cdot x_5 + 0{,}095 \cdot x_6 + 3{,}394 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 + + 0{,}005 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.28)
11	2	$\hat{V} = 2{,}254 + 2{,}260 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - 1{,}133 \cdot 10^{-2} x_4 - 1{,}507 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 + + 0{,}141 \cdot 10^{-2} \cdot x_8$ (4.29)
12	3	$\hat{V} = 2{,}020 + 3{,}865 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0{,}172 \cdot 10^{-2} x_4 - 2{,}478 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.30)
		Visa Lietuva
13	1	$\hat{V} = 0{,}143 - 2{,}934 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0{,}947 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 6{,}688 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + + 0{,}737 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 - 5{,}753 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 8{,}424 \cdot 10^{-2} \cdot x_6 + + 0{,}977 \cdot 10^{-2} \cdot x_7 - 0{,}244 \cdot 10^{-2} \cdot x_8,$ (4.31)
14	2	$\hat{V} = -0{,}421 + 1{,}279 \cdot 10^{-2} \cdot x_5$ (4.32)
15	3	$\hat{V} = 0{,}100 - 2{,}879 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 1{,}710 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 - 0{,}758 \cdot 10^{-2} \cdot x_6$ (4.33)

Iš B priede pateiktų paveikslų bei 4.7 lentelės rezultatų matyti, kad taikant visus koreliacinei analizei naudotus georodiklius, visais atvejais determinacijos koeficientas yra didesnis, negu taikant regresinius modelius, kurių koreliacijos koeficiento reikšmė su vertikaliųjų Žemės putos judesių greičiais $r \geq 0{,}50$ arba taikant atvirkštinę žingsninę regresiją. Todėl vertikaliųjų Žemės plutos judesiams prognozuoti poligono viduje naudosime regresinius modelius, į kuriuos įeina visi georodikliai.

4.4. Regresinių modelių daugiakriterinė analizė

Norint nustatyti, kuriose kartotinių niveliacijų linijose ir kartotinių niveliacijų poligonuose (4.1 pav.) sudaryti vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių regresiniai prognozavimo modeliai geriau atitinka hipotezę apie tektoninę judesių prigimtį, atlikta regresinių modelių daugiakriterinė analizė. Atliekant analizę imama, kad alternatyvų objektai yra kartotinių niveliacijų linijos arba poligonai, objektų (alternatyvų) apibendrinamieji duomenys – nustatytos sąsajos (koreliacijų koeficientai) tarp išmatuotų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių.

Teigiant, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ankstyvesnės tektoninės raidos tęsinys, tyrimui galima taikyti sudėtingų sistemų analizės metodiką, paremtą daugiakriteriniais vertinimais (Zavadskas *et al.* 2001, Hwang, Yoon 1981). Daugiakriterinės analizės taikymo metodika pateikta 2.5 poskyryje. Variantų prioritetiškumo nustatymo blokinė schema pateikta 4.22 paveiksle.



4.22 pav. *Variantų prioritetiškumo nustatymo blokinė schema*

Taikant priimtą modelį, kad dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ankstesnių tektoninių procesų tęsinys, norint nustatyti atskiruose poligonuose atitikties šiai

hipotezei prioritetiškumą pagal koreliacinių priklausomybių visumą, taikytas daugiakriterinės analizės metodas TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metodas (Hwang, Yoon 1981).

Variantų prioritetiškumą, taikant daugiakriterinę analizę (2.5 poskyris (2.30)–(2.37) formulės) nustatysime atskirai kartotinių niveliacijų linijoms bei jas sujungdami į poligonus pagal (4.1 pav.) pateiktą schemą. Pirmuoju atveju pradinių analizei naudojamų rodiklių (kriterijų) matricą (4.9 lentelė) sudarys kartotinių niveliacijų linijose apskaičiuoti koreliacijos koeficientai (3.4 ir 4.4 lentelės), o antruoju atveju pradinių duomenų matricą (4.10 lentelė) sudarys atskirai kiekvienam poligonui apskaičiuoti koreliacijos koeficientai (3.4 ir 4.4 lentelės).

4.9 lentelė. *Pradinių duomenų matrica pagal kartotinių niveliacijų linijas*

j	*i*							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
Vilnius–Jonava	0,25	0,07	0,89	0,88	0,77	0,64	–0,85	–0,85
Jonava–Zarasai–Turmantas	0,31	–0,11	0,89	0,12	0,80	0,62	0,44	0,32
Turmantas–Vilnius	–0,86	–0,31	0,69	–0,94	0,22	0,45	0,93	0,95
Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė	0,63	–0,14	–0,48	0,03	–0,46	–0,28	–0,14	–0,09
Šiauliai–Tauragė–Mikytai	–0,12	–0,49	–0,13	0,24	0,22	–0,32	–0,38	–0,24
Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė	0,07	–0,70	–0,16	–0,41	–0,80	0,81	0,40	0,24
Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai	0,59	0,52	–0,27	–0,57	–0,69	0,40	0,57	0,43
Jonava–Joniškis	0,70	0,28	–0,19	–0,63	0,32	–0,69	0,57	0,62
Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena	0,87	0,53	–0,95	–0,75	–0,89	–0,88	0,53	0,68

Sutartiniai žymėjimai: i *– rodiklių numeriai,* j *– variantų numeriai.*

4.10 lentelė. *Pradinių duomenų matrica kartotinių niveliacijų poligonuose*

j	*i*							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
1 poligonas	0,31	–0,46	–0,27	–0,08	–0,01	–0,47	0,04	0,08
2 poligonas	0,30	–0,41	–0,23	0,47	–0,09	–0,26	–0,48	–0,47
3 poligonas	0,50	0,33	0,74	0,53	0,68	0,50	–0,46	–0,48
4 poligonas	–0,69	0,02	0,29	–0,57	0,45	–0,03	0,70	0,67
5 poligonas	0,33	0,23	–0,03	0,27	0,14	–0,20	–0,32	–0,29

Sutartiniai žymėjimai: i *– rodiklių numeriai,* j *– variantų numeriai*.

Atliekant skaičiavimus, visų rodiklių svoriai imti lygūs vienetui.

Sudarant iš pradinių duomenų matricos virtualųjį geriausią variantą, išrenkamos visų rodiklių didžiausios absoliutinės reikšmės, o virtualųjį blogiausią variantą – mažiausios absoliutinės reikšmės. Apskaičiavus pagal

pateiktą algoritmą (2.30)–(2.37), alternatyvos palygintos pagal apskaičiuotus santykinius atstumus (2.37) iki geriausiojo virtualaus varianto ir nustatyta variantų prioritetiškumo eilė (4.11–4.12 lentelės). Prioritetiškumo tikrinimo hipotezei sudaroma eilė pagal santykinio atstumo iki virtualaus geriausio varianto reikšmę C_{j^*} (2.37). Kuo ši reikšmė didesnė, tuo aukštesnė prioritetiškumo eilė.

4.11 lentelė. *Alternatyvų lyginimas kartotinių niveliacijų linijose*

Eil. Nr.	*Linija*	C_{j^*}
1.	*Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena*	0,54
2.	*Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė*	0,47
3.	*Turmantas–Vilnius*	0,44
4.	*Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai*	0,42
5.	*Jonava–Joniškis*	0,42
6.	*Jonava–Zarasai–Turmantas*	0,34
7.	*Vilnius–Jonava*	0,31
8.	*Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė*	0,31
9.	*Šiauliai–Tauragė–Mikytai*	0,24

Iš 4.11 lentelės matome, kad variantų prioritetiškumo rodikliai linijose tarpusavyje skiriasi daugiau nei du kartus. Geriausi rodikliai yra linijose *Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena*, *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė, Turmantas–Vilnius,* o blogiausi – *Vilnius–Jonava, Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė, Šiauliai–Tauragė–Mikytai*.

4.12 lentelė. *Alternatyvų lyginimas kartotinių niveliacijų poligonuose*

Eil. Nr.	*Poligonas*	C_{j^*}
1.	*4 poligonas*	0,58
2.	*3 poligonas*	0,41
3.	*2 poligonas*	0,30
4.	*1 poligonas*	0,28
5.	*5 poligonas*	0,23

Lyginant alternatyvas poligonuose (4.12 lentelė), matyti, kad hipotezei apie šiuolaikinių Žemės plutos judesių paveldimumą ir tęstinumą atitinka 4 poligonas ir 3 poligonas (4.1 pav.), kuriuose pasireiškia ryškus, su dideliais gradientais dabartinis Žemės plutos kilimas, areališkai sutampantis su Šiaurės Rytų pakiluma. Blogiausioje vietoje pagal prioritetiškumą yra 5 ir 1 poligonai (4.1 pav.). Reikia pažymėti, kad šie kartotinių niveliacijų poligonai neuždari, todėl gali būti mažesnis rezultatų patikimumas.

Atsižvelgiant į tai, kad iš daugiakriterinės analizės poligonuose nustatyti dabartinių Žemės plutos judesių atitikimą teritorijos tektoninio aktyvumo natūralaus tęstinumo prioritetinio rangavimo rodikliai skirtingi, sudarant Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapį rekomenduojama sudaryti fragmentinius regresinius modelius. Fragmentinius modelius tikslinga sutapatinti su kartotinių niveliacijų poligonais.

4.5. Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio sudarymas

Pagal matematinės statistinės vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių analizės rezultatus kartotinių niveliacijų linijose (3.1 ir 4.1 poskyriai) nustatyta vertikaliųjų judesių krypties inversija einant laikui (2A, 3A, 4A). Kadangi einant laikui kinta ne tik vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai, bet ir greičių gradientai, todėl, sudarant Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį nagrinėsime paskutinių dviejų matavimų ciklų duomenis. Tai apims 1965–2006 m. laikotarpiu atliktų tiksliųjų niveliacijų duomenis.

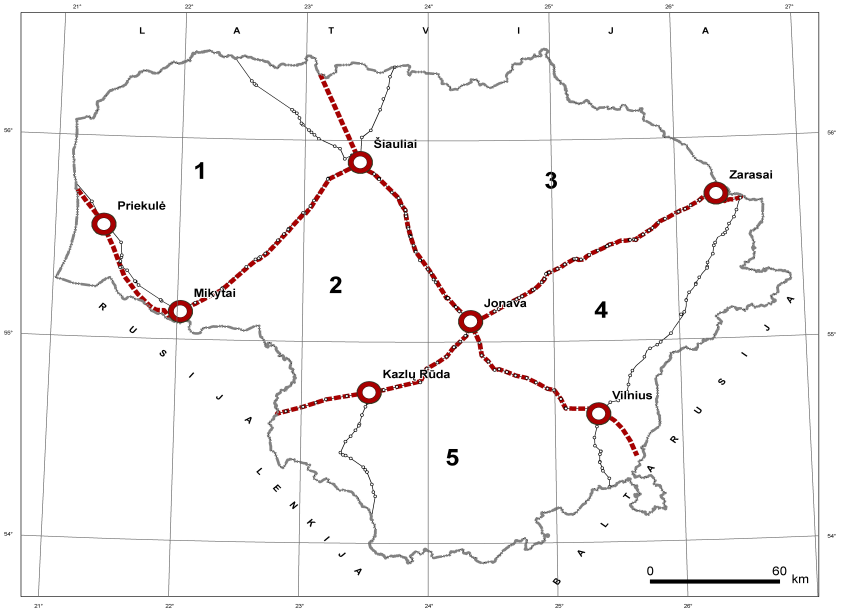
Iš atliktos 3.2, 4.2, 4.4 poskyriuose Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir georodiklių koreliacinės bei daugiakriterinės analizės matyti, kad sąsajos tarp georodiklių ir Žemės plutos judesių yra ne visur vienodos. Tą įtikinamai įrodė ir atlikti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognostiniai tyrimai, taikant vieną regresinį modelį (4.31) visai Lietuvos teritorijai (B priedas).

Atsižvelgiant į gautuosius tyrimo rezultatus ir įvertinant, kad ne visose teritorijos dalyse statistinės priklausomybės tarp išmatuotų dydžių tos pačios, sudarant vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį Lietuva buvo suskaidyta į penkis fragmentus (4.1 pav.). Regresiniai prognozavimo modeliai, taikant visus georodiklius, sudaryti kiekvienam fragmentui – pirmajam poligonui (Šiauliai–Kužiai–Mažeikiai–Lūšė, Šiauliai–Tauragė–Mikytai, Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė) taikyta (4.19) lygtis, antrajam poligonui (Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda–Kybartai, Jonava–Šiauliai, Šiauliai–Tauragė–Mikytai) (4.22) lygtis, trečiajam poligonui (Jonava–Zarasai, Jonava–Joniškis) (4.25), ketvirtajam poligonui (Vilnius–Jonava–Zarasai–Turmantas–Vilnius) (3.10) lygtis, penktajam poligonui (Vilnius–Jonava, Kazlų Rūda–Šeštokai–Lazdijai–Lenkijos siena) taikyta (4.28) lygtis. Taikant sudarytus modelius (4.19, 4.22, 4.25, 3.10, 4.28) prognozuotos pagal georodiklius (4.8–4.15 pav.) dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių reikšmės apskaičiuotos ne tik geodezinių matavimų taškuose niveliacijos linijose, bet ir visame poligono plote tinklelio 15x15 km kertėse. Ši procedūra leidžia dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognozavimą išplėsti į teritorijas, kuriose nėra geodezinių matavimų.

Fragmentų modelių mazginiuose taškuose (4.23 pav.) iš skirtingų modelių prognozuotos reikšmės dėl matavimo paklaidų ar kitų atsitiktinių priežasčių ne visada sutampa. Todėl reikia modelius susieti ir išlyginti.

Modeliams susieti mazginiuose taškuose apskaičiuoti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmių, gautų iš gretimų su tašku besiribojančių linijų regresinių modelių (3.6, 4.6 ir 4.8 lentelės), vidurkiai. Šios mazginių taškų judesių greičių reikšmės (4.13 lentelė) taikomos tolesniais žemėlapio sudarymo etapais. Mazginių taškų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių nustatymo

vidutinė kvadratinė paklaida, apskaičiuota pagal nuokrypas nuo vidurkių, yra 0,25 mm/m.



4.23 pav. *Poligonų mazginių punktų schema*

4.13 lentelė. *Mazginių punktų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių reikšmės ir regresinių modelių redukavimo pataisos*

Mazginis punktas	Koordinatės		$\bar{v}$, mm/m	Δ, mm/m
	x	y		
1 poligonas				
Šiauliai (1110)	6198979,00	457119,00	0,15	–0,12
Mikytai (2087)	6112622,45	369960,75	–0,3	–0,64
Priekulė (3350)	6160890,00	331075,00	–1,41	–0,64
2 poligonas				
Jonava (217)	6107049,89	517385,70	–0,11	–0,63
Šiauliai (1110)	6198979,00	457119,00	0,26	–0,12
Mikytai (2087)	6112622,45	369960,75	0,08	–0,64
Kazlų Rūda (12-421)	6067808,20	465916,02	0,06	–0,30
3 poligonas				
Zarasai (131)	6178100,00	642100,00	1,62	4,06
Jonava (217)	6107049,89	517385,70	–0,5	–0,63
Šiauliai (1110)	6198979,00	457119,00	–0,03	–0,12
4 poligonas				
Vilnius (4774)	6056100,00	582500,00	0,32	–0,15
Jonava (217)	6107049,89	517385,70	–1,34	–0,63
Zarasai (131)	6178100,00	642100,00	1,63	4,06

4.13 lentelės tęsinys

Mazginis punktas	Koordinatės		$\bar{v}$, mm/m	Δ, mm/m
	x	y		
5 poligonas				
Vilnius (4774)	6056100,00	582500,00	0,13	–0,15
Jonava (217)	6107049,89	517385,70	–0,22	–0,63
Kazlų Rūda (12-421)	6067808,20	465916,02	0,03	–0,30

Sutartiniai žymėjimai: $\bar{v}$ *– mazginių taškų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai,* Δ *– poligono regresinių modelių redukavimo į vieną sistemą pataisos mazginiuose taškuose.*

Fragmentinius modelius susiejus mazginiuose taškuose, būtina transformuoti apskaičiuotos diskretiniuose taškuose pagal (4.19, 4.22, 4.25, 3.10, 4.28) formules reikšmes. Transformavimas atliekamas sudarant kiekvieno poligono regresiniam prognozavimo modeliui pataisų lygtį. Pataisų lygčių koeficientai apskaičiuojami žinant mazginiuose taškuose pagal regresinius modelius nustatytų vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmių nuokrypas nuo imtų galutinėmis reikšmėmis vertikaliųjų judesių greičių vidurkių ir mazginių taškų plokštumines koordinates (4.13 lentelė).

Gautos tokios lygtys iš regresinių modelių (4.19, 4.22, 4.25, 3.10, 4.28) apskaičiuotiems vertikaliųjų judesių greičiams redukuoti į bendrąją susietą sistemą:

$$\Delta v_1 = 57{,}983 + 1{,}554 \cdot 10^{-5} y - 1{,}048 \cdot 10^{-5} x ; \quad (4.34)$$

$$\Delta v_2 = -10{,}993 - 9{,}530 \cdot 10^{-7} y + 0{,}188 \cdot 10^{-5} x ; \quad (4.35)$$

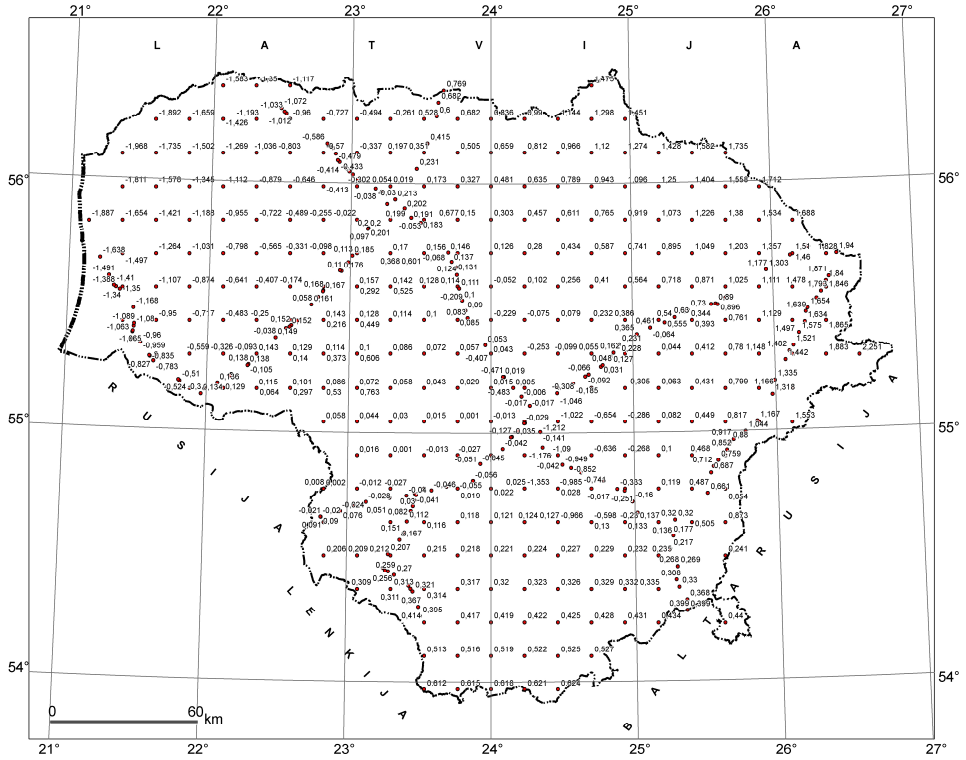
$$\Delta v_3 = -78{,}090 + 1{,}026 \cdot 10^{-5} y + 1{,}184 \cdot 10^{-5} x ; \quad (4.36)$$

$$\Delta v_4 = -6{,}443 + 2{,}452 \cdot 10^{-5} y - 0{,}124 \cdot 10^{-5} x ; \quad (4.37)$$

$$\Delta v_5 = 40{,}130 + 1{,}926 \cdot 10^{-7} y - 0{,}662 \cdot 10^{-5} x ; \quad (4.38)$$

čia Δv_1, Δv_2, Δv_3, Δv_4, Δv_5 – 1, 2, 3, 4, 5 poligonų regresinių modelių judesių greičių pataisos (mm/metus); x, y – LKS 94 koordinačių sistemos taškų plokštuminės koordinatės (m).

Redukuotos reikšmės gaunamos prie regresinių modelių (4.19, 4.22, 4.25, 3.10, 4.28) apskaičiuotų reikšmių pridėjus pagal (4.34)–(4.38) formules apskaičiuotas pataisas. Diskretiniuose taškuose apskaičiuotos pagal (4.34)–(4.38) formules pataisos parodytos 4.24 paveiksle.

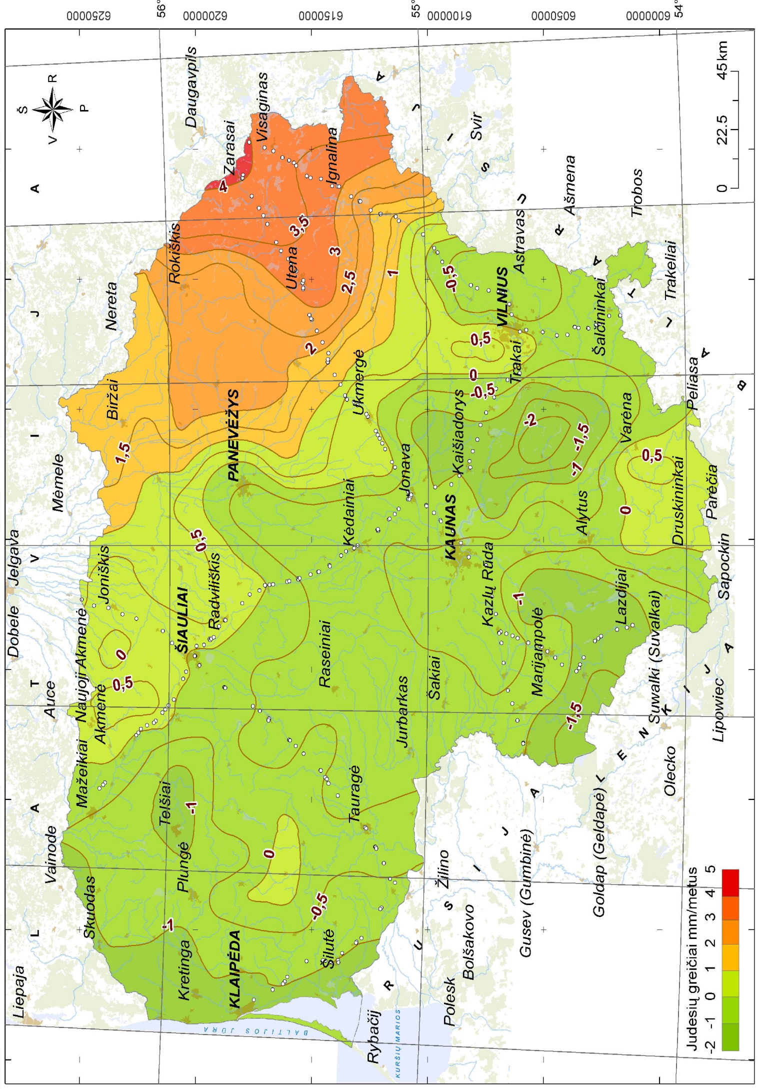


4.24 pav. *Regresinių modelių reikšmių pataisos*

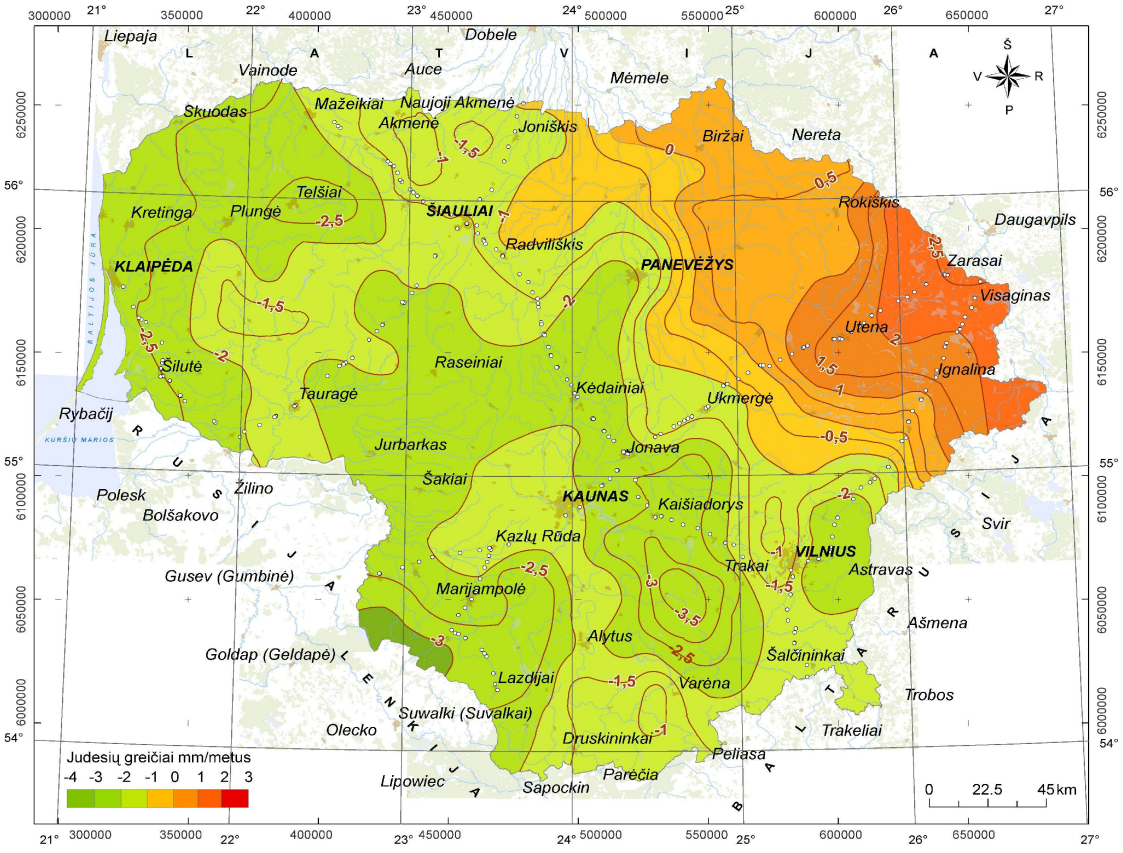
Pagal pirmiau pateiktą metodiką sudarytas dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis Lietuvos teritorijai parodytas 4.25 pav. Sudarant šį žemėlapį pradiniu tašku buvo imtas mazginis punktas *Vilnius*.

Šis pradinis punktas pasirinktas dėl to, kad Vilniuje yra nuolat veikianti GPS stotis, kuri įtraukta į Europos stočių tinklą (EUREF GPS) ir sudaro bendrą Europos aukščių pagrindą (EUVN). Todėl ateityje Lietuvoje atliekamus geodinaminius tyrimus bus galima patogiai susieti su pagal tarptautinę programą atliekamus tyrimus.

Antrasis vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapio variantas (4.26 pav.) sudarytas susiejant greičių reikšmes su Lenkijos teritorijai sudaryto žemėlapio (1.9 pav) greičių reikšmėmis (Kowalczyk 2005; 2006). Lenkijos teritorijoje išmatuoti dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičiai skaičiuoti nuo Wladyslawowo mareografinio punkto, kurio vertikaliųjų judesių greičių reikšmė nustatyta išanalizavus Wladyslawowo, Ustka, Kolobrzeg ir Swinoujscie mareografinių punktų duomenis.



4.25 pav. Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis (pradinis punktas – Vilnius)



4.26 pav. *Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis (susiejant greičių reikšmes su Lenkijos teritorija)*

Iš 4.25 paveikslo matome, kad dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių amplitudė Lietuvos teritorijoje yra nuo –3,5 iki +2,5 mm per metus. Intensyviausias Žemės plutos kilimas ir didžiausia judesių greičių gradientų kaita yra šiaurės rytų Lietuvos dalyje, o grimzdimas – pietrytinėje ir vakarinėje srityje.

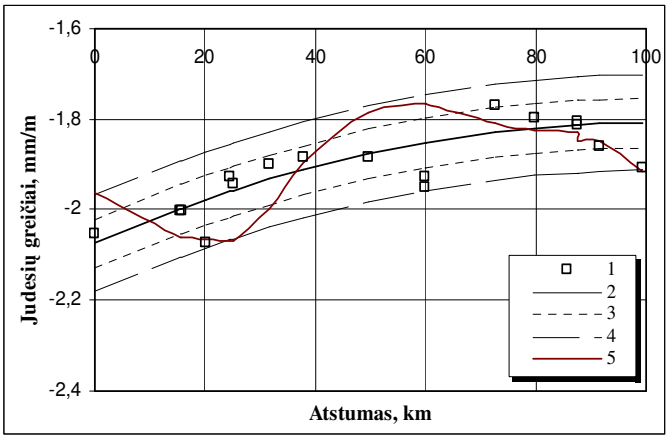
Lygindami sudarytą vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį (4.25 pav.) su 1.1 poskyryje pateiktu J. Randjarvo (1.6 pav.) žemėlapiu matome, kad judesių greičių amplitudė Lietuvos teritorijoje yra panaši ir siekia 6–7 mm per metus. Pagal J. Randjarvo žemėlapį nustatytas maksimalus grimzdimas ties Vilniumi –4 mm/m, o pagal naujai sudarytą žemėlapį (4.25 pav.) maksimalus grimzdimas ties Trakais yra –2 mm/metus. Nagrinėjamų žemėlapių greičių izolinijos yra išsidėsčiusios nevienodai. Kadangi J. Randjarvo žemėlapis sudarytas naudojant kartotines niveliacijas 1927–1973 laikotarpiu, o naujai sudarytas vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis (4.25 pav.) apima 1935–2006 m. matavimų periodą, todėl būtų tikslingiau lyginti kartotinių niveliacijų linijas, atitinkančias J. Randjarvo sudaryto žemėlapio periodą. Iš A priede pateiktų paveikslų matome, kad linijoje *Jonava–Zarasai–Turmantas* 1980–1935/36 m. (A5 pav.) judesių greičių amplitudė yra apie 1,5 mm/m, tokia pati kaip ir sudaryto J. Randjarvo žemėlapio, t. y. abiem atvejais *Turmantas* atžvilgiu *Jonavos* leidžiasi 1,5 mm/metus. Linijoje *Šiauliai–Kužiai–Lūšė* 1965–1931/33 m. (A32 pav.) *Lūšė Šiaulių* atžvilgiu kyla 0,6 mm/metus, o pagal J. Randjarvo sudarytą žemėlapį taip pat kyla apie 0,4 mm/metus. Linijoje *Šiauliai–Tauragė–Mikytai* 1976–1931/32/33/48 (A38 – A39 pav.) abiem atvejais greičių amplitudė yra apie 0,5 mm/metus. Linijoje *Mikytai–Šilutė–Klaipėda–Palanga–Būtingė* 1973/75–1936 m. (A46 pav.) *Klaipėda Mikytų* atžvilgiu kyla abiem nagrinėtais atvejais, greičių amplitudė yra 0,8–1,4 mm/metus.

Nagrinėtų žemėlapių nesutapimai gali būti dėl to, kad žemėlapiams sudaryti buvo naudojami skirtingi kartotinių niveliacijų matavimo duomenys. Pagal J. Randjarvo 1993 m. sudarytą žemėlapį greičių izolinijos poligonų viduje buvo išbrėžtos tiesinio interpoliavimo būdu, turint tik kartotinių niveliacijų linijose apskaičiuotas judesių greičių reikšmes.

4.6. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapio atitikties geodezinių matavimų rezultatams tyrimas ir geotektoninis vertinimas

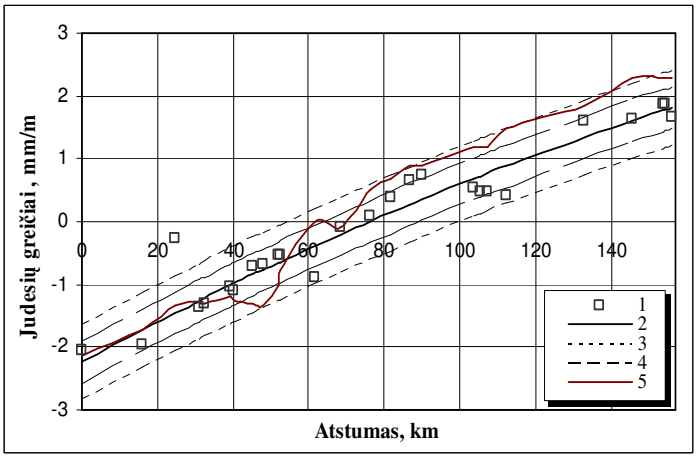
Kad būtų galima išsiaiškinti sudaryto žemėlapio (4.26 pav.) patikimumą ir atitikimą matavimo duomenimis, atliktas tyrimas linijose *Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda, Jonava–Zarasai–Turmantas, Jonava–Šiauliai*. Šiose linijose palygintos išmatuotos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių reikšmės, išmatuotos reikšmės suglotnintos daugianariais, jų 0,95 ir 0,99 tikimybių pasikliautinieji intervalai ir sudaryto vertikaliųjų Žemės plutos judesių

žemėlapio reikšmės (4.27–4.29 pav.).



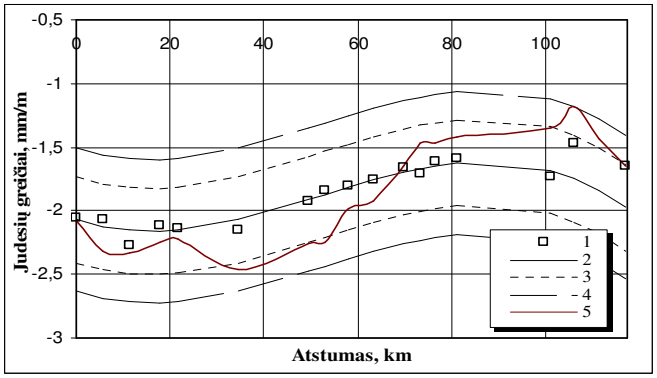
Sutartiniai žymėjimai: 1 – išmatuotos reikšmės, 2 – suglotnintos reikšmės, 3 – 0,99 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 4 – 0,95 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 5 – žemėlapio reikšmės

4.27 pav. V*ertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio atitikties matavimų rezultatams lyginimas linijoje Jonava–Gaižiūnai–Palemonas–Kaunas–Kazlų Rūda*



Sutartiniai žymėjimai: 1 – išmatuotos reikšmės, 2 – suglotnintos reikšmės, 3 – 0,99 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 4 – 0,95 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 5 – žemėlapio reikšmės

4.28 pav. V*ertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio atitikties matavimų rezultatams lyginimas linijoje Jonava–Zarasai–Turmantas*

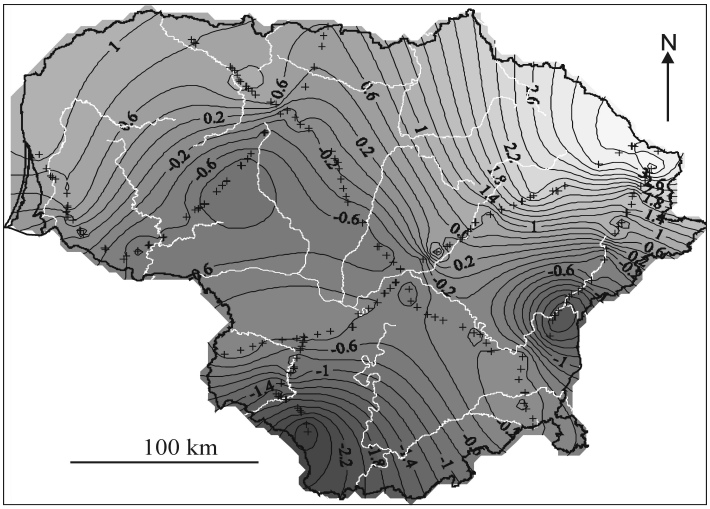


Sutartiniai žymėjimai: 1 – išmatuotos reikšmės, 2 – suglotnintos reikšmės, 3 – 0,99 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 4 – 0,95 tikimybės pasikliautinasis intervalas, 5 – žemėlapio reikšmės.

4.29 pav. V*ertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapio atitikties matavimų rezultatams lyginimas linijoje Jonava–Šiauliai*

Iš šių paveikslų matome, kad žemėlapyje atvaizduotos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių reikšmės patenka į 0,99 tikimybės išmatuotų reikšmių pasikliautinąjį intervalą. Todėl galima teigti, kad pagal taikytą prognozavimo metodiką sudarytas dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis matematiniu statistiniu požiūriu neprieštarauja tiesioginių geodezinių matavimų rezultatams.

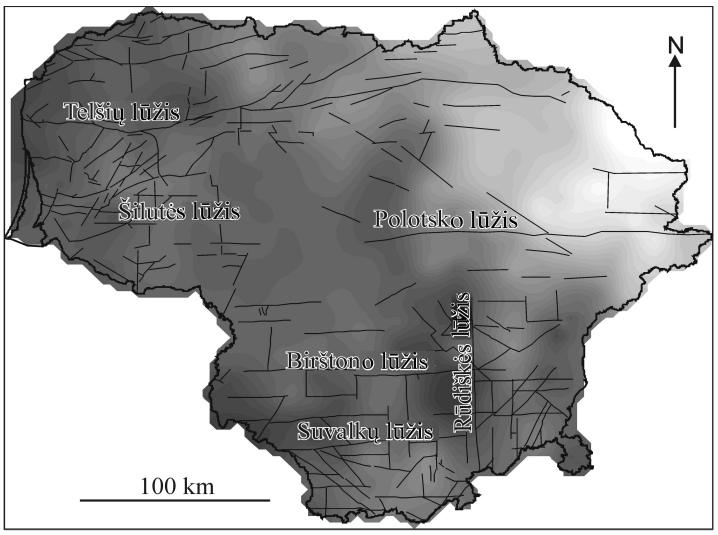
Vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis, sudarytas tik pagal geodezinių matavimų duomenis (pradinis punktas Vilnius), parodytas 4.30 paveiksle.



4.30 pav. V*ertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis pagal geodezinių matavimų duomenis (pradinis punktas Vilnius)*

Iš 4.30 paveikslo matome, kad išmatuoti dabartinių vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių greičiai, pagal geodezinių matavimų duomenis, kinta nuo –2,7 mm iki 3,5 mm/metus (pradinis taškas – mazginis punktas *Vilnius).* Apskritai šiaurinė Lietuvos dalis rodo santykinį tektoninį kilimą. Maksimalus kilimo greitis yra nustatytas šiaurės rytų Lietuvos dalyje. Ši anomalija yra ribojama vakarų–rytų krypties gradiento zonos, apribotos Drūkšių lūžio, detaliai išnagrinėto Ignalinos AE regione (Marcinkevičius, Laškovas 2007). Centrinė Lietuvos dalis rodo nedidelį nuo –0,6 iki –0,8 mm/metus grimzdimą. Lokali grimzdimo –1,8 mm/metus anomalija buvo nustatyta šiaurės rytuose nuo Vilniaus. Intensyviausias grimzdimas nustatytas Lietuvos pietvakariuose ir siekia –2,7 mm/metus.

Palyginus šį žemėlapį su 4.25 paveikslu atvaizduotu žemėlapiu, sudarytu taikant regresinius modelius, galima teigti, kad vertikaliųjų Žemės plutos judesių sklaida ir savybės kartotinių niveliacijų linijose panašios. Tačiau dideli skirtumai kartotinėmis niveliacijomis apribotų poligonų viduje, t. y. ten, kur nėra tiesioginių geodezinių matavimų. Tik pagal geodezinių matavimų duomenis sudarytas vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis (4.30 pav.) areališkai silpniau susietas su geologinėmis teritorijos struktūromis. Taikant regresinius modelius sudaryto žemėlapio (4.25 pav.) vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių kaitos sklaida geriau perteikia geologines struktūras. Taip pat Žemės paviršiaus vertikalių judesių žemėlapis, sudarytas naudojant regresinius modelius (4.25 pav.), yra kur kas detalesnis, palyginti su žemėlapiu, sudarytu pagal geodezinius duomenis (4.30 pav.). Nustatytos skirtingo mastelio aktyvios tektoninės struktūros. Pietinė šiaurės rytų Lietuvos pakilumos riba yra kontroliuojama stambaus mastelio vakarų rytų krypties Polocko lūžio (4.31 pav.).



4.31 pav. *Pagrindiniai lūžiai*

Pakiluma yra susijusi su šiaurės pietų krypties Vilniaus pakiluma, kurios aktyvumas gali būti siejamas su ta pačia kryptimi ištęstų lūžių sistema, didžiausias iš kurių yra Rūdiškių lūžis. Ši pakiluma greičiausiai lemia ryškų Nemuno upės tėkmės krypties pasikeitimą. Vakarinėje Vilniaus pakilumos dalyje išskiriama Trakų įduba. Šiaurinė depresijos dalis buvo perkirsta Vilniaus–Jonavos niveliacijos profilių. Toliau į pietus maksimalus grimzdimas yra nustatytas pagal georodiklius ir yra apribotas prekvartero paviršiuje nustatytos depresijos. Depresija šliejasi prie šiaurės pietų krypties Alytaus pakilumos, kuri iš dalies rodo prekvartero pakilumą, panašią į Lazdijų depresiją vakaruose.

Vakarų Lietuvos ir centrinės Lietuvos įdubos yra atskirtos Rambyno pakilumos, išsidėsčiusios šiaurės pietų kryptimi. Ši pakiluma yra gerai nustatyta permo nuogulose, taip pat atpažįstama prekvartero paviršiuje. Vienas iš ryškiausių vakarų Lietuvos bruožų yra Telšių lūžis, kurio vakarinis šlaitas kiek grimzta. Centrinėje Lietuvos dalyje esantis Šiaulių lūžis, vienas iš ryškiausių prekvartero paviršiaus bruožų, taip pat tektoniškai aktyvus. Centrinės Lietuvos depresija, kitas prekvartero paviršiaus ir dabartinio Žemės paviršiaus reljefo ryškus bruožas, taip pat atsispindi dabartiniuose Žemės paviršiaus vertikaliuosiuose judesiuose.

Apibendrinant galima teigti, kad sudarytas taikant regresinius modelius Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis geriausiai atspindi tektoninių procesų tęstinumą negu tik pagal geodezinius matavimus parengtas žemėlapis. Regresinius vertikaliųjų Žemės plutos judesių modelius galima taikyti vaizduojant judesius kartotinių niveliacijų linijomis apribotų poligonų viduje.

Visai Lietuvos teritorijai pagal nustatytas reikšmes (2.2) sudarytas žemėlapis yra nenuoseklus (4.30 pav.). Pagrindinis šių matavimų trūkumas yra dideli atstumai tarp niveliacijos linijų, ir jo negali kompensuoti gana tankus matavimo punktų išsidėstymas niveliacijos linijose. Vertikalių judesių intensyvumas ir tendencijos tarp niveliacijos linijų yra neaiškios.

Sudarant skaitmeninį prognozuojamų vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį, buvo taikytos geografinės informacinės sistemos (GIS). Duomenims kaupti ir apdoroti sukurta duomenų bazė, apimanti geologinius bei geodezinius duomenis. Prognozuojamų vertikaliųjų Žemės plutos judesių žemėlapis sudarytas Arc GIS 9 programine įranga, naudojant 3D Analyst programą. Taškinės informacijos (480 taškų) interpoliacija atlikta Kriging metodu. Interpoliacija naudojama taškiniams duomenims konvertuoti į ištisinį paviršiaus modelį.

4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Taikant siūlomą kartotinių niveliacijų matavimo rezultatų ir tyrimų regioną apibūdinančių georodiklių bendrą matematinio apdorojimo metodiką, sudarytas naujas Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis.
2. Modeliuojant dabartinius vertikaliuosius Žemės plutos judesius Lietuvos teritorijoje, sudaryti regresiniai modeliai kartotinių niveliacijų linijomis apribotiems poligonams. Pagal pasiūlytą metodiką poligonų regresiniai modeliai susieti ir transformuoti į bendrą sistemą. Taikant fragmentinio modeliavimo metodiką galima įvertinti koreliacinių priklausomybių struktūros sklaidą Lietuvos teritorijoje.
3. Sudarytasis žemėlapis rodo dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių savybes per paskutinius 30–40 metų. Sudarant Lietuvos teritorijos vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapį nagrinėjami 1965–2006 m. atliktų tiksliųjų niveliacijų duomenys.
4. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių amplitudė Lietuvos teritorijoje yra nuo –3,5 iki +2,5 mm per metus. Intensyviausias Žemės plutos kilimas ir didžiausia judesių greičių gradientų kaita yra šiaurės rytų Lietuvoje, o grimzdimas – pietrytinėje ir vakarinėje srityje.
5. Taikant Žemės plutos judesių greičiams modeliuoti regresinius modelius, atsirado galimybė remiantis objektyviomis matematinėmis statistinėmis sąsajomis modeliuoti judesius kartotinių niveliacijų poligonuose. Dėl to labai pagerėja žemėlapio kokybė, palyginti su žemėlapiais, sudarytais tik pagal geodezinius matavimų rezultatus. Žemėlapis gaunamas detalesnis, jis geriau išreiškia teritorijos tektoninio vystymosi ypatumus.
6. Ištirtas naujojo žemėlapio, sudaryto taikant regresinius modelius, patikimumas ir geodezinių matavimų rezultatų atitiktis. Nustatyta, kad žemėlapio adekvatumo matavimo rezultatams tikimybė ne mažesnė už 0,95.
7. Matematiniais statistiniais metodais su tikimybe $p \geq 0{,}95$ nustatytos vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių krypties inversijos einant laikui.

Bendrosios išvados

1. Parengta dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių modeliavimo ir vertinimo metodika, paremta geodezinių matavimų ir regioną apibūdinančių georodiklių matematiniu statistiniu apdorojimu.

2. Atlikus išmatuotų skirtingais laiko tarpais vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių matematinę statistinę analizę, su tikimybe $p \geq 0{,}95$ nustatyta, kad einant laikui kinta ne tik judesių greitis, bet ir kryptis. Todėl Žemės plutos judesių modeliai ir tyrimų rezultatai turi būti siejami su konkrečiu laikotarpiu.

3. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognozavimo regresiniai modeliai su tikimybe $p \geq 0{,}95$ adekvatūs geodeziniams matavimams.

4. Nustatyta, kad dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir teritorijos georodiklių sąsajos ne visur vienodos. Sąsajų pobūdis ir struktūra turi regioninių ypatumų. Todėl, sudarant regresinius prognozavimo modelius, reikia remtis fragmentiniais modeliais.

5. Regresinius prognozavimo modelius galima taikyti ne tik kartotinių niveliacijų linijose, bet ir kartotinių niveliacijų linijomis apribotuose poligonuose, kur nėra geodezinių matavimų.

6. Regresiniams dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių prognozavimo modeliams vertinti geotektoniniu požiūriu galima taikyti daugiakriterinės analizės metodiką.

7. Taikant siūlomą metodiką, sudarytas naujas Lietuvos teritorijos dabartinių vertikaliųjų žemės plutos judesių greičių žemėlapis.

8. Nustatyta, kad dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių amplitudė Lietuvos teritorijoje yra nuo –3,5 iki +2,5 mm per metus. Intensyviausias Žemės plutos kilimas ir didžiausia judesių greičių gradientų kaita yra šiaurės rytų Lietuvoje, o grimzdimas – pietrytinėje ir vakarinėje srityje.

9. Taikant pasiūlytą metodiką sudarytasis dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių greičių žemėlapis, palyginti su žemėlapiu, sudarytu tik pagal geodezinių matavimų duomenis, yra detalesnis, geriau išreiškia tektoninius teritorijos ypatumus.

10. Apibendrinant Lietuvos teritorijoje atliktų tyrimų rezultatus galima teigti, kad siūloma metodika tinka dabartiniams vertikaliesiems Žemės plutos judesiams tirti, modeliuoti ir žemėlapiams sudaryti.

Literatūros sąrašas

Basalykas, A. 1958. Lietuvos upių dinaminių fazių interpretavimo klausimu, *LTSR MA darbai*, ser. B, 3, Vilnius, 203–210.

Beconis, M. 1960. Lietuvos TSR upių salpių išplitimas ir tipai, *Geografinis metraštis*, Vilnius, 161–169.

Bergsten, F. 1930. Changes of level on the coast of Sweden, *Geografiska Annaler*, 12(1): 21–55.

Bikis, J. 1940. Zemes garozas kustinu ietekme precizas limetnošabas darbas Baltijas jūras piekrastē, *Latvijas universitates raksti*, 6(2).

Blomqvist E.; Renqvist, H. 1914. Wasserstrands beobachtungen an den Küsten Fihnlands, *Fennia*, 1(37).

Bonaccorso, A. 2002. Ground deformation of the southern sector of the Aeolian islands volcanic arc from geodetic data, *Tectonophysics*, 351(issue 3): 181–192.

Carrera, G. H.; Vaniček, P. 1987. Review of techniques for determining vertical ground movements from levelling data, in *Proc 3rd International*

Symposium on Land Subsidence, Venice, 19–25 march 1984, 195–202. Publ Wallingford: IAHS. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics. Abstracts*, 24 (issue 5): 193.

Carrera, G.; Vaniček, P. 1988. A comparison of present sea level linear trends from tide gauge data and radiocarbon curves in Eastern Canada, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 68 (issues 2–4): 127–134.

Constantinescu, L. 1966. Evidence of recent crustal movements in Roumani and problems facing their research, in *Proc. of the 2-d Intern. Sympos*. on *Recent Crustal Movements*, Helsinki.

Česnauskienė, J. 2002. Vertikaliųjų Žemės paviršiaus judesių prognozavimo Holto metodu galimybės, *Geodezija ir kartografija*, 2(28): 49–53.

Česnauskienė, J.; Aleknienė, E. 2001. Adaptyvusis žemės paviršiaus judesių modelis Ignalinos AE geodinaminio poligono šiaurinėje dalyje, *Geodezija ir kartografija*, 2(27): 74–80.

Dailidienė, I.; Stankevičius, A.; Tilickis, B. 2004. Kuršių marių ir pietrytinės Baltijos jūros dalies vandens lygio daugiamečių svyravimų analizės metodologiniai ypatumai, *Geodezija ir kartografija*, 2(30): 58–64.

D'anastasio, E.; De Martini, P.M.; Selvaggi, G.; Pantosti, D.; Marchioni A.; Maseroli, R. 2006. Short-term vertical velocity field in the Apennines (Italy) revealed by geodetic levelling data, *Tectonophysics*, 418 (issues 3–4): 219–234.

Dėnas, Ž.; Kumetaitis, A.; Šliaupa, S.; Zakarevičius, A. 2005. Application of GIS for Surface Erosion Model of Lithuania, *Social Strategies*, 40: 209–220.

Dėnas, Ž.; Kumetaitis, A.; Šliaupa, S.; Zakarevičius, A.; Šliaupienė, R. 2006. Lietuvos žemės paviršiaus erozijos modeliavimas ir kartografavimas taikant GIS technologijas, *Geodezija ir kartografija*, 32(3): 57–61.

Edelman, T. 1954. Tectonic movements as resulting from the comparison of two precision levellings, *Geol. en mijnbouw*, 16(16).

Edge, R. C. A. 1957. Some Considerations Arising from the Results of the Second and the Third Geodetic Levellings of England and Wales, in *Printed of XI Gen. Assembly IUGG*.

Ernsperger, W.; Kok, J. J. 1986. Status and Results of the 1986 Adjustment of the United European Levelling Network – UELN 73, in *Paper contributed to the Symposium and Height Determination and Recent Crustal Movements in Western Europe*, Federal Republic of Germany.Klug, A. 1994. Untersuchungen im Westeuropäischen Höhennetz, *Diplomarbeit. Technical University Dresden, Dresden*, 120 p.

Fedotov, S. A.; Maguskin, M. A.; Kirienko, A. P.; Zharino, N. A. 1992. Vertical ground movements on the coast of the kamchatka Gulf: their specific features in the epicentral zone of the August 17, 1983, earthquake M = 6.9, before and after, *Tectonophysics*, 202 (issues 2–4):157–162.

Fedotov, S. A.; Zolotarskaya, S. B.; Maguskin, M. A.; Nikitenko Yu. P.; Sharoglazova, G. A. 1988. The study of deformations of the earth's surface on the Kamchatka Peninsula: repeated geodetic measurements, *Journal of Geodynamics*, 10 (issues 2–4): 175–188.

Fujii, Y. 1993. Vertical crustal movement in the Boso peninsula, South Kanto, Japan, as deduced from the adjustment of a geodetic network with signals, *Tectonophysics*, 218 (issue 4): 309–322.

Gimenez, J.; Surinach, E.; Fleta, J.; Goula, X. 1998. Recent vertical movements from high-precision leveling data in northeast Spain, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Science*, 327 (issue 1): 55–60.

Giménez, J.; Surinach, E.; Goula, X. 2002. Quantification of vertical movements in the eastern Betics (Spain) by comparing levelling data, *Tectonophysics*, 351 (issue 3): 181–192.

Gudelis, V. 1955a. Lietuvos pajūrio neotektoninio aktyvumo klausimu, *Lietuvos TSR MA darbai*, Vilnius, Serija B. 3, 26–38.

Gudelis, V. 1955b. Lietuvos TSR Baltijos pajūrio geologinės raidos vėlyvajame glaciale ir postglaciale (holocene) pagrindiniai etapai, Vilniaus Valstybinio V. Kapsuko vardo universiteto Mokslo darbai.

Gudelis, V. 1957. Žemės plutos judesių pobūdžio nustatymas, remiantis senųjų kranto linijų epeirogeniniais spektrais, *Lietuvos TSR Mokslų akademijos darbai*, serija B1.

Gutenberg, B. 1941. Changes in sea level, postglacial uplift and mobility of the Earth‘s interior, *Bulletin Geological Society of America*, 52: 721–772.

Hwang, C. L.; Yoon, K. 1981. Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications, Berlin, Heidelberg, New York: *Springer* – Verlag, 259 p.

Ihde, J. 1987. Improved precision levelling for deriving significant vertical movements of the earth's crust, *Geodynamics*, 8 (issues 2–4): 313–320.

Ilginytė, V. 1998. Lietuvos seismiškai aktyvios tektoninės zonos, *Geologija*, 23: 61–64.

Ilginytė, V.; Bernadskis, V.; Suveizdis, P.; Šalavėjus, S. 1994. Seismic – tectonic activity of Middle Lithuania, *Geologija*, 16: 56–60.

Ilginytė, V.; Suveizdis, P. 1994. Lietuvos seismologinio monitoringo kūrimo problemos, *Gelmių geologinio tyrimo, naudojimo ir apsaugos problemos Lietuvoje*, Vilnius, 53 p.

Ilginytė, V.; Šalavėjus, S. 1994. Seismometriniai matavimai Lietuvoje, *Gelmių geologinio tyrimo, naudojimo ir apsaugos problemos Lietuvoje*,Vilnius 52 p.

Ishii, H.; Komukai, Y.; Takagi, A. 1981. Characteristics of vertical land movement and microearthquake activity in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, 77 (issues 3–4): 213–231.

Joo, E.; Csati, P.; Jovanovič, M.; Popescu, V. I.; Somov, H.; Thurm, J.; Thury, I.; Totomanov, N.; Vanko, J.; Wyrzykowski, T. 1981. Recent vertical crustal movements of the Carpatho-Balkan region, *Tectonophysics*, 71 (issues 1–4): 41–52.

Joo, I.; Arabadžijski, D.; Fury, M.; Meščerskij, I. N.; Mihaila, M.; Mladenovski, M. M.; Nemeth, Z.; Steinberg, J.; Thury, J.; Vanko, J. *et al.* 1988. New investigations or recent vertical movements in the Carpatho-Balkan region, *Geodynamics*, 9 (issues 1): 63–74.

Joo, I. 1992. Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin, *Tectonophysics*, 202 (issues 2–4): 129–134.

Jucevičiūtė, V.; Kumetaitis, Z.; Šleiteris, E.; Būga, A.; Obuchovski, R.; Paršeliūnas, E. K.; Petroškevičius, P.; Putrimas, R. 2003. *Trends of development of the Lithuanian national geodetic control, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*. Frankfurt am Main, 29: 273–281.

Jucevičiūtė, V.; Kumetaitis, Z.; Šleiteris, E.; Būga, A.; Paršeliūnas, E. K.; Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A. 2004. Development of the Lithuanian National Geodetic Control, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, in *Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) held in Toledo*, 4-7 june 2003. Frankfurt am Main. , Band 33(13): 255–258.

Kaariainen, E. 1953. On the recent uplift of the Earth‘s crust in Finnland, Fennia, 2(77).

Kazakevičius, S. V. 2000. Pagrindinio Lietuvos niveliacijos tinklo atnaujinimas ir sutankinimas 1970-1987 m., *Žemėtvarka ir melioracija*, 1(101): 94–106.

Kazakevičius, S. V. 1998. Pirmieji krašto niveliacijos tinklai Lietuvoje, *Žemėtvarka ir melioracija*, 3 (95): 72–82.

Kazakevičius, S. V.; Būga, A. 2004. Baltijos geodezijos komisijos veikla tarpukariu, *Geodezija ir kartografija*, 1(30): 1a–1f.

Kazakevičius, S. V.; Krikštaponis, B.; Tumelienė, E. 2006. Lietuvos pagrindinių niveliacijos linijų aukščių skirtumų pokyčiai, *Žemėtvarka ir hidrotechnika*, 2: 29–38.

Kazakevičius, S.; Stepanovienė, J. 1993. Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono niveliacija, *Geodezijos darbai*, 19: 56–65.

Klebleyev, A. Kh.; Martynovski, S. A. 1988. Study of recent crustal movements on apsheron peninsula by geodetic methods, *Geodynamics*, 10 (issues 2–4): 207–212.

Kowalczyk, K. 2005. Determination of land uplift in the area of Poland, *Environmental Engineering. 6th International Conference,* May 26-27,

Vilnius, Lithuania [elektroninis išteklius]: proceedings [CD]. ISBN 9986-05-858-9. Vilnius, 903–907.

Kowalczyk, K. 2006. New model of the vertical crustal movements in the area of Poland, *Geodezija ir kartografija*, 4(32): 83–87.

Krikštaponis, B. 2000. Matavimų analoginiais ir skaitmeniniais nivelyrais tikslumo tyrimai, *Geodezija ir kartografija*, 2(26): 69–72.

Krikštaponis, B.; Tulevičius, V. 2001. Precizinių kodinių niveliavimo matuoklių tyrimai, *Geodezija ir kartografija*, 1(27): 13–19.

Krikštaponis, B.; Paršeliūnas, E. K.; Petroškevičius, P.; Putrimas, R.; Zakarevičius, A. 2007. Realization of the vertical datum and height system of Lithuania, in p*roceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service*. Ankara. spec. (iss. 18): 142–147.

Kriščiūnas, A. 1939. Lietuvos precizinės niveliacijos altitudžių katalogas, Kaunas.

Kumetaitis, Z.; Petroškevičius, P.; Paršeliūnas, E.; Ramanauskas, R.; Zakarevičius, A. 1994. National Report of Lithuania, in *Report on the Symposium for the European Reference Frame (EUREF) held in Warschaw* 8–11 June 1994, München, 309–315.

Lang, H.; Sacher, M. 1995. Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN – 95), in *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) held in Kirkkonummi*, Finland, May 3 – 6, 86– 96.

Lang, H.; Sacher, M. 1996. Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN – 95), in *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) held in Ankara*, Turkey, May 22 – 25, 163–169.

Lang, H.; Sacher, M. 1997. Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN – 95), in *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the*

European Reference Frame (EUREF) held in Sofia, Bulgaria, June 4 – 7, 85–90.

Liesis, I. 1962. Dabartiniai žemės plutos vertikalieji judesiai Pietrytiniame Pabaltijyje, *Geografinis metraštis*, Vilnius, 5: 214–320.

Lietuvos geologija. Sudarė Grigelis, A., Kadūnas, V. 1994. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 447 p.

Malzer, H. 1981. Height changes and recent vertical crustal movements in Western German areas – instrumental improvements, *Tectonophysics*, 71 (issues 1–4): 53–63.

Martišius, S. A.; Kėdaitis, V. 2004. Statistika II dalis, Statistikos išvados ir sprendiniai. Vilnius: VU leidykla, 341 p.

Marcinkevičius, V., Laškovas, J. 2007. Geological structure of the Ignalina Nuclear Power Plant area, *Geologija*, 58: 16–24.

Meade, B. K. 1957. Geodetic surveys for monitoring crustal movements in the United States, *Tectonophysics*, 29.

Miyabe, N. 1952. Vertical Earth movements in Japan as deduced from the results of rerunning the precise levellings, *Bulletin Earthquake. Res. Inst*., 2(30).

Model, P. 1950. Geogenwärtige Küsfenbebund im Osteraum Mitteilugen der geographischen Gesellschaft in Hamburg, *Band–XLIX*, Hamburg, 150.

Mrlina, J.; Špičak A.; Skalsky, L. 2003. Non-seismological indications of recent tectonic activity in the West Bohemia earthquake swarm region, *Geodynamics*, 35 (issues 1–2): 221–234.

Murray, J. B.; Wooller, L. K. 2002. Persistent summit subsidence at Volcan de Colima, Mexico, 1982–1999: strong evidence against Mogi deflation, *Volcanology and Geothermal Research*, 117 (issues 1–2): 69–78.

Nakano, T. 1954. Crustal movements and shoreline development along the Pacific coast of Japan since Holocene period, in *A report on the geomorphological studies of lowlands of Japan. Bulletin. Geogr. Surv. Institute*, 1(4).

Paršeliūnas, E.; Marozas, L. 2007. Klaipėdos jūros lygio stebėjimo stoties duomenų perdava beveik realiuoju laiku, *Geodezija ir kartografija*, 1(33): 31–35.

Paršeliūnas, E. K. 2008. Geodezinio pagrindo sudarymo ir plėtros technologijų tobulinimas, *Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga*. Vilnius: Technika, 36 p.

Paršeliūnas, E. K.; Sacher, M.; Ihde, J. 2000. Preparation of Lithuanian levelling network data for united European levelling network, *Geodezija ir kartografija*, 4(26): 171–186.

Petroškevičius, P.; Paršeliūnas, E. K. 1998. Europos vertikaliojo tinklo plėtimas Lietuvos teritorijoje, *Geodezija ir kartografija*, 3(24): 133–145

Petroškevičius, P.; Tulevičius, V. 1996. Construction of the Lithuanian Geodetic Network by GPS, *Geodezija ir kartografija*, 2 (22): 98–102.

Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A.; Tulevičius, V. 1996. Possibilities of the Geodynamic Investigation in Lithuania, in *Studies of the Baltic Sea,* Riga, 18–32.

Petroškevičius, P.; Putrimas, R.; Krikštaponis, B.; Būga, A.; Neseckas, A.; Obuchovski, R.; Stepanovienė, J.; Tumelienė, E.; Viskontas, P.; Zigmantienė, E. 2005. Analysis of normal height differences determination in Lithuanian national geodetic vertical network, *Environmental Engineering. 6th International Conference*, May 26-27, Vilnius, Lithuania [elektroninis išteklius]: proceedings [CD], Vilnius, 1-10.

Popescu M. N.; Dragoescu, J. 1987. Maps of recent vertical crustal movements in Romania: Similarities and differences, *Geodynamics*, 8 (issues 2–4): 123–136.

Radulescu, F.; Ghitau, D.; Nacu, V.; Stiopol, D. 1992. Study of recent crustal movements in Romania (Gruiu-Caldamsani polygon), *Tectonophysics*, 202 (issues 2–4): 141–144.

Randjarv, J. 1993. Vertical movements of the Earth's crust in the Baltic Region, in *Reports of the Finish Geodetic Institute*, 93:2, Helsinki, 38 p.

Reichardt, G.; Steinberg, J. 1987. The prediction of vertical movements of the earth's crust from 1st and 2nd order repeated levelling for the territory of the GDR, *Geodynamics*, 8 (issues 2–4): 137–142.

Rigo, A.; Cushing, M. 2000. Effets topographiques sur les comparaisons de profils de nivellement: Cas français de Saint-Paul-de-Fenouillet (Pyrenees-Orientales) et d'Arudy (Pyrenees-Atlantiques), *Tectonophysics*, 317 (issues 3–4): 237–258.

Sacher, M.; Lang, H.; Ihde, J. 1998. Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN – 95), in *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF)* held in Bad Neuenahr – Ahrweiler, June 10 – 13, 131–141.

Sacher, M.; Ihde, J.; Celms, A.; Ellmann, A. 1999. The first UELN stage is achieved, further steps are planned, in *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF)* held in Prague, June 2 – 5, 87–94.

Sieger, R. 1893. Seeschwahkungen und Strandverschiebungen in Skandinavien, *Z. Ges. Erdk*., Berlin, 28 p.

Skeivalas, J. 2007a. Geodezinio vertikaliojo tinklo išlyginimo modelis eliminuojant sistemingąsias klaidas, *Geodezija ir kartografija*, 2(33): 47–49.

Skeivalas, J. 2007b. Geodezinių tinklų sudarymas klasių pavidalu, *Geodezija ir kartografija*, 3(33): 72 – 74.

Skeivalas, J. 1995. Koreliuotų geodezinių matavimų rezultatų matematinis apdorojimas, Vilnius: Technika, 272 p.

Skeivalas, J.; Aleknienė, E.; Gečytė, S.; Zigmantienė, E. 2007. Geodezinio vertikaliojo tinklo klaidų analizė taikant skirtingus išlyginimo modelius, *Geodezija ir kartografija*, 2(33): 55–60.

Skeivalas, J.; Putrimas, R.; Krikštaponis, B. 1999. Precizinio niveliavimo klaidų kovariacinė analizė, *Geodezija ir kartografija*, 4(25): 146–149.

Staples, J. E. 1987. Monitoring of movement of potential earthquake areas with precise distance measuring and leveling systems, *Geodynamics*,8 (issues 2–4): 313–320.

Stiros, S.C.; Psimoulis, P.; Pitharouli, S. 2007. Geodetic constraints to the kinematics of the Kapareli fault, reactivated during the 1981, Gulf of Corinth earthquakes, *Tectonophysics*, in Press, Corrected Proof. Available online 22 February.

Suveizdis, P. 2003. Lietuvos tektoninė sandara, Vilnius: Geologijos ir geografijos institutas, 160 p.

Šliaupa, S. 1995. Neotectonic active linear zones in Lithuania, in *Abstracts of 9 th Lithuanian symposium on arts and sciences*, 249 p.

Šliaupa, S.; Bitinas, A.; Zakarevičius, A. 2005a. Predictive model of the vertical movements of the earth‘s surface with respect to the land use of the Lithuanian coastal area, *Social Strategies*, 40: 221–236.

Šliaupa, S.; Dėnas, Ž.; Korabliova, L. 2005b. Bouguer anomalijų žemėlapio patikslinimas GIS priemonėmis, *Geodezija ir kartografija*, 2(31): 41–46.

Šliaupa, S.; Pačėsa, A.; Satkūnas, J. 2005c. Naujausi žemės drebėjimai Baltijos regione ir Lietuvos seisminis monitoringas, *Geologija*, 50: 8–18.

Šliaupa, S.; Šliaupa, A.; Zakarevičius, A. 2004. Tektoninių procesų tendencijos neotektoniniame etape ir jų prognozė, *Lietuvos žemės gelmių raida ir ištekliai*. *Litosfera*, 610–613.

Šliaupa, S.; Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2006. Strain and stress fields in the Ignalina NPP area from GPS data and thin – shell finite element modelling, *Geologija*, 56: 27–35.

Takayama, H.; Yoshida, A. 2003. Temporal change of the vertical crustal movement on the western coast of Suruga Bay, central Japan, *Quaternary International*, 101–102: 137–148.

Thurm, H. 1977. Ableitung von Gradienten rezenter vertikaler Erdkrus tenbewegungent für das Gebiet der DDR, *Petermanns Geogr. Mitt.,* 2: 115.

Triantaphyllou, E. 2000. Multi-criteria Decision Making Methods: a Comparative Study, *Kluwer Academic Publishers*, 290 p.

Ukawa, M.; Fujita, E.; Ueda, H.; Kumagai, T.; Nakajima, H.; Morita, H. 2006. Long-term geodetic measurements of large scale deformation at Iwo-jima caldera, *Volcanology and Geothermal Research*, 150 (issues 1–3): 98–118.

Vanko, J. 1988. A rectified map of recent vertical surface movements in the West Carpathians in Slovakia, *Geodynamics*, 10 (issues 2–4): 147–155.

Vanko, J.; Vyskočil, P. 1987. The map of vertical crustal movements in Czechoslovakia and its interpretation, *Geodynamics*, 8 (issues 2–4): 143–150.

Verio, A. 1983. Vertical movements in connection with earthquakes in Finland, *Tectonophysics*, 97 (issues 1–4): 157.

VGTU Aplinkos inžinerijos fakultetas Geodezijos institutas. Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo sudarymas. Mokslo darbų ataskaita (VI dalis), 2005.

VGTU Aplinkos inžinerijos fakultetas Geodezijos institutas. Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo sudarymas. Mokslo darbų ataskaita, 2006.

VGTU Aplinkos inžinerijos fakultetas Geodezijos institutas. Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo sudarymas. Mokslo darbų ataskaita, 1998.

Vyskočil, P. 1979. New results on the properties of recent crustal movements in the Bohemian Massif and its boundary with the West Carpathians, *Tectonophysics*, 52 (issues 1–4): 193-201.

Vyskočil, P. 1987. The dynamics of the northwestern border of the Carpathians, *Geodynamics*, 8 (issues 2-4): 163-169.

Witting, R. 1918. Hafsytan, geoidytah och landhojningen utmed Baltiska hafvet och vid Nordsjon, *Fennia*, 39(5).

Witting, R. 1922a. Landhöjningen récent de la Fennoscandie, *Geografiska Annaler*.

Witting, R. 1922b. Le soulévement récent de la Fennoscandie, *Geografiska Annaler*, 4: 458–487.

Wyrzykowski, T. 1987. A new determination of recent vertical movements of the Earth's crust in Poland, *Geodynamics*, 8 (issues 2–4): 171–178.

Zakarevičius, A. 2007. Dabartinių geodinaminių procesų įvertinimas sudarant vertikaliuosius geodezinius tinklus, *Geodezija ir kartografija*, 3(33): 65–68.

Zakarevičius, A. 2003a. Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas, Vilnius: Technika, 195 p.

Zakarevičius, A. 1994a. Dabartinių vertikalių Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas, Vilnius: Technika, 276 p.

Zakarevičius, A. 2000. Lietuvos teritorijos žemės plutos dabartinio geodinaminio aktyvumo ir neotektoninio fono sąsajos, *Geodezija ir kartografija*, 3(26): 111–115.

Zakarevičius, A. 1983. Pabaltijo pakartotų niveliacijų tikslumo analizė modeliavimo būdu, *Geodezijos darbai*, T. 12: 38–46.

Zakarevičius, A. 1995. Summary of the results of the correlative analysis of the maps on the recent vertical movements of the earth's crust in the territory of the Lithuania, *Geodezija ir kartografija*, 2 (22): 64–71.

Zakarevičius, A. 1997. The results of investigation of Vertical movements of the Earth Crust in Ignalina Nuclear Power Plant geodynamic polygon, *Geodezija ir kartografija*, 1(25): 78–85.

Zakarevičius, A. 1994b. Vertikalių žemės paviršiaus judesių Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiame poligone analizė, *Geodezijos darbai*, 19: 101–108.

Zakarevičius, A. 1975. Vertikalių žemės plutos judesių kaip atsitiktinės funkcijos tyrimas, *Geodezijos darbai*, 7: 28–32.

Zakarevičius, A. 2003b. Žemės paviršiaus judesių matavimo ir geologinių rodiklių sąsajų informatyvumas, *Geodezija ir kartografija*, 2(29): 51–56.

Zakarevičius, A.; Petroškevičius, P.; Kumetaitis, Z.; Paršeliūnas, E. K. 2002. Development of geodetic networks in Lithuania by space technique, *Aviacija*, 6,: 141–153.

Zakarevičius, A.; Puzienė, R. 2005. Išmatuotų Lietuvos pajūrio žemės paviršiaus judesių ir teritorijos geologinių rodiklių sąsajos, *Geodezija ir kartografija*, 3(31): 92–96.

Zakarevičius, A.; Ramanauskas, R. 1985. Žemės paviršiaus vertikaliųjų judesių tyrimas dispersinės analizės būdu. *Geodezijos darbai*, T. 13, 58–61.

Zakarevičius, A.; Ruzgienė, B. 1994. Vertikaliųjų žemės paviršiaus judesių Lietuvoje analizė pagal pakartotų niveliacijų linijas, *Geodezijos darbai*, 19: 116–122.

Zakharov, V. K. 1986. Recent crustal movements and the Moneron earthquake of 1971, *Tectonophysics*, 120 (issues 1-2): 163–171.

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Banaitienė, N. 2001. Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinė analizė, Vilnius: Technika, 379 p.

Аксамитаускас, Ч.; Закарявичюс, А.; Крикштапонис, Б.; Петрошкявичюс, П. 2004. Геодезическая вертикальная сеть Литвы, *Інженерна геодезія:* Науково-технічний збірник. Київ, вып. 50, 11–23.

Билинский, А. И.; Кузнецов, В. Г.; Мельничук, М. И.; Сомов, В. И. 1980. Анализ комплекса геолого-геофизических и геодезических исследований на Карпатском геодинамическом полигоне, *Современные движения земной коры*. Киев: Наукова думка, 179–187.

Боборикин, А.; Авотиня, И. и др. 1988. Каталог исторических землетрясений Белоруссии и Прибалтики, *Сейсмологических бюлетень сейсмических станций*, Минск, 126–137.

Брегман, Г. Р. 1947. Геодезические высоты в связи с проблемой уровня Каспия, *Метеорология и гидрология*, 1:

Буланже, Ю. Д.; Лилиенберг, Д. А. 1973. Итоги международнго сотрудничества стран Восточной Европы по составлению сводной карты современных вертикальных движений земной коры, *Современные движения земной коры*, Тарту, 5: 9–13.

Буланже, Ю. 1987. К вопросу об исследовании современных вертикальных движений земной коры, в кн. *Результаты исследований по международным геофизическим проектам*, Москва, 6–19.

Валлнер, Л.; Торим, А.; Сильдвэ, Х. 1975. Геодинамические миниполигоны на территории ЭССР, *Современные движения земной коры*. Тарту, 101–105.

Вереда, В.С.; Юрченко Б. К.; Суровцев В. Г.; Урманцев, Ф. М. 1980. Результаты исследований современных движений земной коры на Донбасском геодинамическом полигоне за 1966–1977 гг., *Современные движения земной коры*. Киев: Наукова думка, 190–195.

Гуделис, В. 1973. Рельеф и четверичные отложения Прибалтики, Вильнюс, 264 с.

Гуделись, В. К. 1957. Определение характера движений земной коры по эпейрогеническим спектрам древнебереговых линий (клинометрический анализ), Тр. АН Лит.ССР. Сер. техн. н., 59–63.

Дейнега, Г. И.; Каспаров, С. А.; Дейнега, А. Г. 1980. Геолого-геоморфологические особенности северодагестанского геодинамического полигона в связи с проблемой техногенных землетрясений, *Современные движения земной коры*, сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 195–198.

Желнин, Г. А. 1957. Изучение вертикальных движений земной коры в ЭССР методом повторных нивелировок, *Известия АН Эстонской ССР*, Сер. техн. н, 3.

Желнин, Г. А. 1960. Изучение вертикальных движений земной коры в Эстонской ССР методом повторных нивелировок, в кн.: *Неотектонические движения в Прибалтике*. Тарту, 76–87.

Желнин, Г. А. 1975. О достоверности карт (схем) скоростей современных движений земной коры (на примере карт территории Прибалтики), *Современные движения территории Прибалтики*. Тарту, 13–27.

Желнин, Г. А. 1973. Результаты изучения современных движений Прибалтики, в кн. *Современные движений земной коры*, Тарту, 5: 79–88.

Желнин, Г., Валлнер, Л., Сильдвэ, Х. 1975. Результаты первого этапа изучения современных движений земной поверхности территории ЭССР, *Современные движения земной коры*, Тарту, 95–100.

Закарявичюс, А. 1979. Корреляционный анализ карт современных движений земной коры на территории Прибалтики, *Труды по геодезии,* Вильнюс, 9: 75–78.

Закарявичюс, А. 1972. Применение математических методов при изучении вертикальных движений земной поверхности на стационарных полигонах и в городах, *Современные движения земной коры*,Тарту, 5: 371–376.

Закарявичюс, А.; Гуделис, В. 1980. Некоторые вопросы количественного анализа карт современных движений земной коры на территории Прибалтики, *Современные движения земной коры*, Киев, 28–32.

Закарявичюс, А.; Рузгене Б. 1980a. Корреляционный анализ карт современных движений земной коры на территории Литвы, *Труды по геодезии*, Вильнюс, 10: 31–35.

Закарявичюс, А.; Рузгене, Б. 1980b. Некоторые вопросы вероятно-статистического анализа вертикальных движений земной поверхности, *Труды по геодезии*, Вильнюс, 10: 42–54.

Закарявичюс, А.; Турий, Н. 1988. Частичное исключение систематических ошибок измерений при исследовании вертикальных движений земной коры по линии Борисов-Вилейка геодинамического полигона, *Известия вузов*, *Геодезия и аэрофотосъемка*, 5: 57–64.

Захаров, В. К.; Семакин, В. П.; Якушко Г. Г. 1978. Движения земной поверхности на юго-западе Сахалина и Монеронское землетрясение 1971 г., *Современные движения земной коры*. Новосибирск: Наука, 33–39.

Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. Москва, 1971, 18.

Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. Москва, 1973.

Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть), Чехословакии. Масштаб 1:10000000, ГУГК СССР, 1986.

Лесис, И. 1963. Современные вертикальные движения земной коры на территории Юго-Восточной Прибалтики по данным высокоточных нивелировок, *Современные движения земной коры*. Москва, 88–94.

Лесис, И. 1960. Современные движений земной коры на территории юго-западной Прибалтики по данным точных и высокоточных нивелировок, в кн. *Неотектонические движения в Прибалтике*. Тарту, 42–55.

Лесис, И.; Гуделис, В. 1961. Вертикальные движения земной коры на территории юго-Восточной Прибалтики, *Неотектоника СССР*. Рига, 117–131.

Лилиенберг, Д. А.; Сетунская, Л. Е.; Благоволин, Н. С. и др. 1972. Морфоструктурный анализ современных вертикальных движений Европейской части СССР, *Геоморфология*, 1: 1–18.

Лыков, В. И.; Старченко, А. И.; Шиханович, Э. Л. 1980. Особый вид быстрых тектонических движений, *Современные движения земной коры*: сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 40–44.

Матцкова, В. А. 1965. О периоде современных движений и качественной характеристике кривой скорости движения, *Современные движения земной коры*. Тарту, 2: 233–240.

Матцкова, В. А. 1963. Уточненная карта скорости современных вертикальных движений земной коры на западе Европейской части СССР и некоторые соображения о периоде этих движений, в кн. *Современные движений земной коры*, Москва, 1: 73–87.

Мещеряков, Ю. 1965. Структурная геоморфология равнинных стран, Москва, 390 с.

Мещеряков, Ю.А. 1958. *Современные движения земной коры*, *Природа*, 9.

Никонов, А. А. 1979. *Современные движений земной коры*, Москва, 192 с.

Никонов, А. А.; Энман, С. В. 2007. Анализ вертикальных движений земной коры в период Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. (по уровнемерным данным), *Физика Земли*, 6: 52–65.

Орвику, К. 1960. О неотектонических движениях в Эстонской СССР на основе геологических данных, *Неотектонические движения в Прибалтике*. Тарту, 120–143.

Победоносцев, С. В. 1968. Многолетние колебания среднего уровня и современные вертикальные движения земной коры на побережьях морей европейской части территории СССР, *Современные движения земной коры*. Москва: Изд-во АН СССР, 3: 162–170.

Победоносцев, С. В. 1973. Океанографическое обоснование карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы для побережья морей Европейской части СССР, в кн. *Современные движений земной коры*, Тарту, 5: 16–25.

Победоносцев, С. В. 1971. Применение расчетного средне-годового уровня моря для определения современных вертикальных движений земной коры, *Геодезия и картография*. Москва, 3: 18–28.

Ражинскас, А. 1975. Геопотенциальное поле Прибалтики и его связь с современными движениями земной коры, *Современные движения Прибалтики*. Тарту, 58–63.

Рандярв, Ю. Ю. 1968. *Исследование современных вертикальных движений земной коры в Прибалтике геодезическим методом*, Автореферат, Москва. 30.

Рандярв, Ю. Ю. 1975. Современные вертикальные движения земной коры в Прибалтике по данным высокоточных нивелировок 1930–1970г., *„Труды ЛСХА“,* Т. 5, Елгава, 21–37.

Рождественский, А. П., Журенко, Ю. Е. 1961. Современные тектонические движения Западного Приуралья и прилегающей части Южного Урала, *Современные тектонические движения земной коры и методы их изучения*. Москва.

Современные вертикальные движения земной коры. Труды ЦНИИГА и К., 1958, выпуск 123, Москва, 1–296.

Сомов, В. И.; Рахимова, И. Ш. 1983. Современные движения земной коры Карпато-Балканского региона и сопредельных структур, Киев: Наукова думка, 144 с.

Филькин, В. А. 1980. Соотношение современных тектонических движений с экзогенными рельефообразующими процессами на Речицком геодинамическом полигоне, *Современные движения земной коры*, сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 233–237.

Якубовский, О. В. 1965. Вертикальные движения земной коры на побережье Балтийского моря, *Современные движения земной коры*. Тарту, 2: 225–231.

Якубовский, О. В. 1966. *Исследование вертикальных движений земной коры на побережье Балтийского моря методом водного нивелирования.* Автореферат, Москва, 26 с.

Якубовский, О. В. 1973. Уточненная карта вертикальных движений земной коры побережье Балтийского моря, в кн. *Современные движения земной коры*. Тарту, 5: 72–78.

Шляупа, А. 1972. Геотектонические движения на территории западной Литвы, *Труды по геодезии*, 6: 52–60.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose (*Thomson ISI Proceedings*)

1. Zakarevičius, A.; Šliaupa, S.; Puzienė, R.; Anikėnienė, A.; Būga, A.; Dėnas, Ž. 2005. Tectonic interpretation of measured recent movements of the earth surface of sedimentary basin, in *Proceedings of the 6th International Conference „Environmental Engineering" Selected Papers, Vol. II, 26–27 May, 2005, Vilnius, Lithuania.* Vilnius: Technika, 1034–1040. ISBN 9986-05-851-1.

2. Zakarevičius, A.; Šliaupa, S.; Dėnas, Ž.; Stanionis, A.; Anikėnienė, A.; Puzienė, R. 2008. Inheritance of the recent vertical movements of the Earth's crust and relationship to the topography in Lithuania, in *Proceedings of the 7th International Conference „Environmental Engineering" Selected Papers,*

Vol. III, 22–23 May, 2008, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1508–1513. ISBN 978-9955-28-265-5.

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo (Thomson *ISI Master Journal List*) leidiniuose

3. Zakarevičius, A.; Anikėnienė, A. 2007. Peculiarities of present geodynamic processes in the North eastern Lithuania, *Baltic surveying'07: transactions of the Estonian University of Life Sciences*, *May 9–11, 2007*. Ministry of Agriculture of Lithuania, Lithuanian University of Agriculture. Tartu: Estonian University of Life Sciences, 224: 122–147. ISSN 1406–4049.

Straipsniai LMT patvirtintose tarptautinėse duomenų bazėse

4. Zakarevičius, A.; Anikėnienė, A. 2007. Dabartinių geodinaminių procesų tyrimas šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje, *Geodezija ir kartografija,* 2(33): 41–46. ISSN 1392–1541. (Compendex).

5. Zakarevičius, A.; Anikėnienė, A. 2007. Dabartinių vertikaliųjų žemės plutos judesių Šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje regresiniai modeliai, *Geodezija ir kartografija*, 4(33): 91–97. ISSN 1392-1541. (Compendex).

Straipsniai kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose

6. Zakarevičius, A.; Puzienė, R.; Anikėnienė, A. 2005. Geotectonic interpretation of recent earth crust movements in sedimentary basins, *International symposium on „Modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields": papers: 3–4 November 2005, Sofia, Bulgaria.* Union of surveyors and land managers in Bulgaria. 225–235.

7. Anikėnienė, A.; Zakarevičius, A. 2005. Dabartinių žemės paviršiaus judesių sąsajų su geologiniais rodikliais daugiakriterinis vertinimas, *8–osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities", įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24 d., pranešimų medžiaga: Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius: Technika, 35–39. ISBN 9986-05-876-7.

8. Anikėnienė, A.; Zakarevičius, A. 2006. Rodiklių svorių įtaka žemės plutos judesių geotektoninei interpretacijai taikant daugiakriterinės analizės metodą, *9–osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis", įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 30 d., pranešimų medžiaga. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, 108–113. ISBN 9955-28-037-9.

9. Anikėnienė, A.; Zakarevičius, A. 2007. Svyruojamieji žemės plutos judesiai šiaurės rytų Lietuvoje, *10–osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis", įvykusios Vilniuje 2007 m. kovo 29 d., pranešimų medžiaga.* Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 270–278. ISBN 978-9955-28-162-7.

10. Anikėnienė, A.; Puzienė, R. 2006. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių geotektoninis interpretavimas taikant statistinę ir daugiakriterinę analizę, *Respublikinė mokslinė – praktinė konferencija „ Matavimų inžinerija ir GIS", Mastaičiai*. 4–9. ISBN 9955-586-97-4.

11. Zakarevičius, A.; Anikėnienė, A. 2007. Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių ir geologinės sandaros sąsajos rytinėje Lietuvos dalyje, *Respublikinė mokslinė – praktinė konferencija „ Matavimų inžinerija ir GIS", Mastaičiai*. 97–99. ISBN 978-9955-27-033-1.

Priedai

Priedai pateikti skaitmeninėje laikmenoje

A PRIEDAS. Išmatuoti ir suglotninti tiesiniu ir antrosios eilės daugianariu regresiniu modeliu vertikalieji Žemės plutos judesiai.

B PRIEDAS. Vertikaliųjų Žemės plutos judesių regresinių modelių grafikai kartotinių niveliacijų linijose ir poligonuose.

Asta Anikėnienė

DABARTINIŲ VERTIKALIŲJŲ ŽEMĖS PLUTOS JUDESIŲ
TYRIMAS IR MODELIAVIMAS
TAIKANT GEODEZINIUS MATAVIMUS
(LIETUVOS TERITORIJOS PAVYZDŽIU)
Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, matavimų inžinerija (10T)

RESEARCH AND MODELING
OF THE RECENT VERTICAL MOVEMENTS
OF THE EARTH'S CRUST ON THE BASIS OF GEODETIC MEASUREMENTS
(SAMPLES ON LITHUANIAN TERRITORY)
Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Measurement Engineering (10T)

2008 12 08. 13,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika", Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius, *http://leidykla.vgtu.lt*
Spausdino UAB „Baltijos kopija", Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, *http://www.kopija.lt*