

VILNIAUS UNIVERSITETAS
GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS

Andrius Pačėsa

**PLATFORMINIŲ MAŽO SEISMINIO AKTYVUMO SRIČIŲ
SEISMINIO PAVOJAUS VERTINIMAS BALTIJOS REGIONO
PAVYZDŽIU**

Daktaro disertacija
Fiziniai mokslai, geologija (05P)

Vilnius, 2016

Disertacija rengta 2009 – 2014 metais Gamtos tyrimų centro Geologijos ir geografijos institute.

Mokslinis vadovas - prof. habil. dr. Saulius Šliaupa (Gamtos tyrimų centras, fiziniai mokslai, geologija – 05P)

Padėka

Norėčiau padėkoti savo darbo moksliniam vadovui prof. habil. dr. Sauliui Šliaupai už nuolatinį palaikymą per visus studijų metus, už visokeriopą pagalbą ir vertingus patarimus ruošiant disertaciją.

Dėkoju Lietuvos geologijos tarnybai (LGT), suteiktas galimybes naudotis kompiuterine infrastruktūra, duomenų bazėmis ir fondais.

Dėkoju Danutei Baršauskaitei, padėjusiai įskaitmeninti tektoninius žemėlapius.

Taip pat labai nuoširdžiai dėkoju savo šeimai ir savo sutuoktinei Giedrei, kuri nuolatos palaikė mano pasiryžimą tęsti doktorantūros studijas, rūpindamasi visu tuo, kuo aš dėl laiko stokos nespėjau pasirūpinti.

TRUMPINIAI

AE – atominė elektrinė.

AF – grunto virpesių slopimo funkcija.

DSPV – Deterministinis seisminio pavojingumo vertinimo metodas.

GBF – sutrumpinimas iš *Generalized Beam Forming* (angl. k.) – Generalizuotas spindulio formavimas – vienas iš pilnai automatinių seiminių signalų apdorojimo metodų taikomas NORSAR seismologiniame centre.

GFZ – GeoForschungsZentrum (vok. k.), Vokietijos geomokslų tyrimų centras.

HUSI – Helsinkio universiteto Seismologijos institutas.

I_0 – Žemės drebėjimo intensyvumas epicentre.

LAGMC – Latvijos aplinkos, geologijos ir meteorologijos centras.

LGT – Lietuvos geologijos tarnyba.

M – nenurodyto tipo magnitudė. Magnitudė yra skaičius proporcingas žemės drebėjimo metu išsiskyrusiai energijai.

M_0 – tam tikra pasirinkta slenkstinė magnitudė. Dažniausiai seisminis katalogas yra laikomas pilnu visoms magnitudėms didesnėms už M_0 . Ši magnitudė taip pat naudojama TSPV skaičiavimuose.

m_b – tūrinių seisminių bangų magnitudė. Ši magnitudė yra skaičius proporcingas žemės drebėjimo metu išsiskyrusiai energijai. m_b yra lygi prie maksimalios (tūrinių bangų) grunto dalelių virpesių amplitudės padalintos iš virpesių periodo dešimtainio logaritmo pridėjus pataisą, kuri priklauso nuo atstumo nuo seisminės stoties iki drebėjimo epicentro ir drebėjimo hipocentro gylio.

M_L – lokali magnitudė arba Richter'io magnitudė. Ši magnitudė yra proporcinga energijos kiekiui išsiskyrusiam žemės drebėjimo metu. M_L yra lygi iš maksimalios Wood-Anderson seismografu užregistruotos seismogramos amplitudės dešimtainio logaritmo atėmus atstumo nuo seisminės stoties iki drebėjimo epicentro pataisą.

M_{\min} – mažiausia magnitudė, kuri naudojama TSPV skaičiavimuose. Seisminių įvykių turinčių mažesnes magnitudes įtaka nėra vertinama.

M_W – momento magnitudė. Ši magnitudė yra skaičius proporcingas žemės drebėjimo metu išsiskyrusiai energijai. Ji yra apskaičiuojama sudauginus uolienų standumą su vidutiniu poslinkio palei lūžį dydžiu ir lūžio plotu, palei kurį įvyko poslinkis.

NORSAR – *Norwegian Seismic Array* (angl. k.), Nepriklausomas seismologinių tyrimų centras Norvegijoje.

PGA – *Peak Ground Acceleration* (angl. k.), maksimalus grunto dalelių virpesių pagreitis.

P – pietų kryptis.

PR – pietryčių kryptis.

PV – pietvakarių kryptis.

PŽDZ – potencialios žemės drebėjimų zonos.

R – rytų kryptis.

r. i. – rytų ilguma.

SAS – seisminio aliarmo sistema.

SMS – seisminio monitoringo sistema.

SZ – seimogeninė zona.

SZB – seismotektoninio zonavimo būdas.

Š – šiaurės kryptis.

š. p. – šiaurės platumas.

ŠR – šiaurės rytų kryptis.

ŠV – šiaurės vakarų kryptis.

TSPV – Tikimybinis seisminio pavojingumo vertinimo metodas.

TTZ – Teisseyre-Tornquist zona.

UTC – sutrumpinimas iš *Temps Universal Coordonné* (pranc. k.) - universalus laikas arba Grinvičo laikas.

V – vakarų kryptis.

ŽDZ – žemės drebėjimų zonos.

TURINYS

ĮVADAS	7
1. RYTŲ BALTIJOS REGIONO ANKSTESNIŲ TYRIMŲ IR SEISMINIO AKTYVUMO APŽVALGA	12
1.1. REGIONO SEISMINIO AKTYVUMO APŽVALGA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI.....	12
1.2. STIPRIŲ UŽREGIONINIŲ ŽEMĖS DREBĖJIMŲ POVEIKIS RYTŲ BALTIJOS REGIONUI.....	26
1.3. RYTŲ BALTIJOS REGIONO INSTRUMENTINIŲ SEISMOLOGINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA	31
1.4. SEISMINIO PAVOJINGUMO TYRIMAI BALTIJOS REGIONE	43
1.5. APIBENRDINIMAS	51
2. TYRIMO METODIKA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI.....	52
2.1. TIKIMYBINIO SEISMINIO PAVOJINGUMO VERTINIMO METODIKA ...	52
2.2. SEISMINIO PAVOJINGUMO MODELIAVIMO PRIEMONĖS	59
2.3. DUOMENŲ ŠALTINIAI	60
3. RYTŲ BALTIJOS REGIONO SEISMINIO PAVOJINGUMO VERTINIMAS	62
3.1. ŽEMĖS DREBĖJIMŲ KATALOGAS IR SEISMOGENINIŲ ZONŲ IŠSKYRIMAS	62
3.2. SEISMOGENINIŲ ZONŲ CHARAKTERISTIKOS	85
3.4. SEISMOTEKTONINIŲ MODELIŲ LOGINIO MEDŽIO SUDARYMAS	101
3.5. SEISMINIO PAVOJINGUMO MODELIAVIMO REZULTATAI.....	102
IŠVADOS	126
LITERATŪRA	127

ĮVADAS

Rytų Baltijos regionas priskiriamas prie mažai seismiškai aktyvių regionų, tai siejama su jo kratonine padėtimi. Visgi praeityje čia buvo užfiksuotas ne vienas pakankamai stiprus žemės drebėjimas, kuris, esant išplėtotai industrijai, gali sukelti nemažus pavojus. Darbas skirtas sisteminiam ir detaliam seisminio pavojaus ištyrimui panaudojant patikimas metodikas ir adaptuojant jas Rytų Baltijos regiono geologinėms sąlygoms.

Tiriamos teritorijos apibrėžimas. Tiriama teritorija – Rytų Baltijos regionas – yra žemyninė dalis į rytus nuo Baltijos jūros – vakarinė ir rytinė teritorijos ribos sutampa atitinkamai su 19° ir 29° rytų ilgumos (r. i.) dienovidiniais, o pietinė ir šiaurinė ribos sutampa su 53° ir 60° šiaurės platumos (š. p.) lygiagretėmis. Nors pasirinktas regionas apibrėžia ir dalį Baltijos jūros, darbe nagrinėjama tik sausuminė dalis, nes jūrinėje dalyje turima per mažai seismologinės informacijos, kad būtų galima atlikti patikimą seismotektoninę analizę. Nagrinėjamas regionas aprėpia Estijos, Latvijos ir Lietuvos respublikas, šiaurės-vakarų Baltarusijos Respublikos dalį, Rusijos Federacijos Kaliningrado sritį ir šiaurės-rytų Lenkijos Respublikos dalį.

Darbo svarba ir aktualumas. Rytų Baltijos regionas pasižymi labai mažu seisiniu aktyvumu, tačiau per visą rašytinį šio regiono istorijos periodą (~700 metų) čia buvo užregistruota virš 40 juntamų ar net vidutinio stiprumo žemės drebėjimų. Galimų drebėjimų pavojingumas ypač išryškėjo po 1976 m. Osmusarės saloje Estijoje įvykusio 4,7 magnitudės ($M = 4,7$) žemės drebėjimo ir 2004 m. Kaliningrado srityje (Rusija) įvykusių dviejų žemės drebėjimų, kurių momento magnitudės įvertintos $M_W = 5,0$ ir $M_W = 5,2$. Rytų Baltijos regionas yra gana stipriai industrializuotas: Estijoje yra dešimtys degių skalūnų kasyklų ir juos naudojančių šiluminių elektrinių, Latvijoje yra jau neveikiantis mokslinis Salaspilio atominis reaktorius ir Dauguvos upės užtvanka, Lietuvoje yra uždaryta Ignalinos atominė elektrinė (AE), Nemuno užtvanka, Jonavoje esanti ir azoto trąšas gaminanti „Achemos“ įmonė, Kėdainiuose esanti ir mineralines trąšas gaminanti įmonė „Lifosa“,

Mažeikiuose esanti stambi naftos perdirbimo įmonė „Orlen“, Klaipėdoje – suskystintų dujų terminalas. Be to, Lietuvoje planuojama uždarytos Ignalinos AE vietoje statyti naują Visagino AE. Baltarusijoje netoli Lietuvos sienos (~50 km.) statoma Baltarusijos AE, o Kaliningrado srityje statoma „Baltiskaya“ AE. Esant gana aukštam industrializacijos lygiui ir potencialiai pavojingomis įmonėmis, net ir vidutinio stiprumo žemės drebėjimai gali sukelti nemažas avarijas.

Iki šio darbo buvo keletas bandymų pagal vieną ar kitą metodiką vertinti Rytų Baltijos ar atskirų jos dalių seisminį pavojingumą. Tačiau tie bandymai buvo gana fragmentiški arba atlikti naudojant dalinai deterministinio seisminio pavojingumo metodiką. Todėl šiame darbe atliktas naujas Rytų Baltijos seisminio pavojingumo vertinimas naudojant pažangesnę ir patikimesnę tikimybinio seisminio pavojingumo metodiką.

Šio darbo metu sudaryti nauji Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapiai gali būti panaudoti vertinant jau esamų ar naujai statomų potencialiai pavojingų įmonių kompleksinį saugumą.

Taip pat vienas iš svarbių šio darbo rezultatų yra santykio tarp vietinio seisminio pavojingumo ir seisminio pavojingumo, susijusio su Vrančos (Rumunija) seismogeninės zonos, esančios už 1300 km, aktyvumu, nustatymas.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Šio darbo tikslas yra įvertinti tikimybinio seisminio pavojingumo metodo panaudojimo galimybes platforminių mažo aktyvumo sričių pavojingumo vertinimui remiantis Rytų Baltijos regiono pavyzdžiu. Siekiant įgyvendinti darbo tikslą darbe yra nagrinėjami tokie pagrindiniai uždaviniai:

- 1) Sudaryti Rytų Baltijos regiono žemės drebėjimų katalogą.
- 2) Susisteminti Rytų Baltijos tektoninę ir seismotektoninę informaciją.
- 3) Sudaryti seismogeninių zonų (SZ) žemėlapius ir nustatyti jų seismologines charakteristikas.
- 4) Įvertinti užregioninių žemės drebėjimų įtaką Rytų Baltijos seisminiam pavojingumui.

- 5) Parinkti alternatyvias Rytų Baltijos regionui geriausiai tinkančias seisminių virpesių slopimo funkcijas.
- 6) Susisteminti SZ charakteristikas panaudojant loginio medžio metodologiją.
- 7) Įsisavinti tikimybinio seisminio pavojingumo vertinimui skirtą programinę įrangą CRISIS2007 ir paruošti duomenis Rytų Baltijos seisminio pavojingumo vertimui.
- 8) Naudojantis tikimybinio seisminio pavojingumo vertinimo ir loginio medžio metodikomis apskaičiuoti Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumą skirtingiems tikimybės lygiams (pasikartojamumo periodams).
- 9) Sudaryti Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapius.
- 10) Sudaryti pasirinktos vietovės grunto dalelių pagreičių spektrus skirtingiems tikimybės lygiams (pasikartojamumo periodams).
- 11) Atlikti gautų rezultatų analizę ir pateikti išvadas.

Metodai. Šiuo metu seisminiam pavojingumui vertinti seismologijoje yra naudojami du pagrindiniai metodai: deterministinis seisminio pavojingumo vertinimo (DSPV) metodas ir tikimybinis seisminio pavojingumo vertinimo (TSPV) metodas. DSPV dažniausiai analizuoja tam tikros vietovės maksimalų seisminį pavojingumą, kurį įtakoja viena ar kelios arčiausiai esančios SZ. Dažniausiai pasirenkama SZ vieta, kur jau anksčiau buvo įvykęs žemės drebėjimas, nustatomas maksimalus jo galingumas ir paskaičiuojamas tam tikros vietos seisminis pavojingumas. Šis metodas nenusako laiko intervalų, per kuriuos tam tikrą vietą gali sudrebinti apskaičiuoto dydžio grunto virpesiai. TSPV metodas vertina visas išskirtas ir nutolusias skirtingais atstumais SZ, nurodant tų zonų charakteristikas (geografinę SZ aprėptį, stipriausią stebėtą žemės drebėjimą, stipriausią galimą drebėjimą, didesnių už referencinę magnitudę žemės drebėjimų skaičių per metus, drebėjimų pasiskirstymą pagal stiprumą ir vidutinį hipocentrų gylį). Be to, TSPV metodas leidžia vertinti prognozuojamo tam tikros vietos virpesių stiprumo viršijimo tikimybes ir jų pasikartojamumo laikotarpius. Šių dienų pasaulinėje seisminio pavojingumo praktikoje dažniausiai naudojamas TSPV metodas.

Šiame darbe buvo naudotas loginio medžio metodas. Kai duomenų apie tam tikrą reiškinį yra mažai, jie yra netikslūs ar reiškinius aprašantys modeliai nėra pakankamai patikimi, galima sudaryti tam tikrą grupę įvairių modelių ar vieną modelį su visa grupe skirtingų parametrų ir taip vertinti įvairius galimus scenarijus.

Tyrimų naujumas ir originalumas.

- 1) Pirmą kartą buvo vertintas viso Rytų Baltijos regiono seisminis pavojingumas panaudojant tikimybinio seisminio pavojingumo metodiką.
- 2) Pirmą kartą apjungtos tikimybinio seisminio pavojingumo vertinimo ir loginio medžio metodikos siekiant nustatyti Rytų Baltijos regiono seisminį pavojingumą ir tikslumą.
- 3) Pirmą kartą vertinant Rytų Baltijos regiono seisminį pavojingumą buvo atsižvelgta į užregioninių žemės drebėjimų poveikį.

Ginamos pozicijos.

- 1) Seisminiam pavojingumui vertinti galima patikimai naudoti tikimybinio seisminio pavojingumo vertinimo metodiką net ir labai mažo seisminio aktyvumo regionuose.
- 2) Vertinant seisminį pavojingumą efektyvu naudoti loginio medžio metodiką, kuri leidžia valdyti ir vertinti seisminio pavojingumo paklaidas.
- 3) Vertinant mažo seisminio aktyvumo regionų, tokių kaip Rytų Baltijos, seisminį pavojingumą be vietinių SZ būtina atsižvelgti ir į užregioninių žemės drebėjimų įtaką.

Darbo teorinė ir praktinė reikšmė. Mažo seismingumo teritorijos seisminio pavojingumo vertinimui adaptuota metodika, naudojama didesnio aktyvumo srityse. Nustatytas Baltijos regiono seisminis pavojingumas, į kurį turi būti atsižvelgiama plėtojant padidinto pavojingumo objektų tinklą.

Pradinė medžiaga ir asmeninis indėlis. Naudoti Šiaurinės Europos ir gretimų teritorijų anksčiau sudaryti seisminių įvykių katalogai, Rytų Baltijos regiono tektoniniai žemėlapiai ir susijusi informacija. Darbo autorius sudarė naują jungtinį Rytų Baltijos seisminių įvykių katalogą, sudarė SZ alternatyvius žemėlapius ir seismotektoninius modelius, atliko tikimybinis seisminio

pavojingumo skaičiavimus, sudarė Rytų Baltijos regiono maksimalių grunto dalelių pagreičių (PGA) žemėlapius skirtingiems pasikartojamumo periodams.

Rezultatų aprobavimas. Padaryti aštuoni pranešimai tarptautinėse konferencijose.

Publikacijos. Disertacijos tema publikuoti 4 straipsniai moksliniuose žurnaluose, su bendraautoriais paruošti 2 skyriai dviejose monografijose.

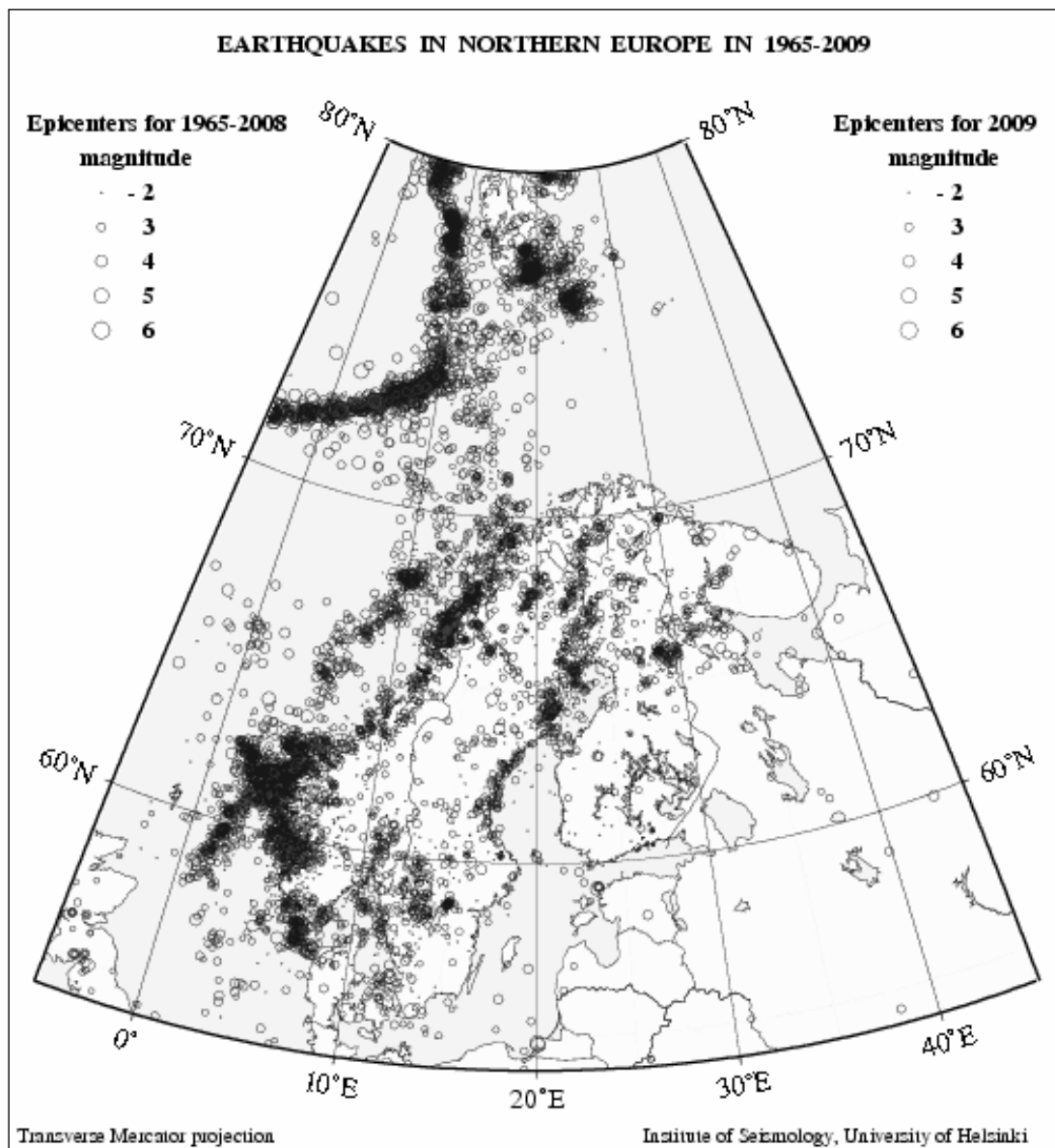
Darbo apimtis. Doktorinį darbą sudaro įvadas, 3 skyriai, išvados ir literatūriniai šaltiniai. Darbo apimtis – 139 puslapių su 36 paveikslais ir 7 lentelių. Literatūros sąrašė – 116 pozicijų.

1. RYTŲ BALTIJOS REGIONO ANKSTESNIŲ TYRIMŲ IR SEISMINIO AKTYVUMO APŽVALGA

1.1. REGIONO SEISMINIO AKTYVUMO APŽVALGA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI

Rytų Baltijos regionas yra vakarinėje Rytų Europos platformos dalyje, kur susisiekia trys stambios tektoninės struktūros: Baltijos sinteklizė, Mozūrijos–Baltarusijos anteklizė ir Latvijos balnas (Сувейздис и др., 1979). Rytų Baltijos regiono seisminis aktyvumas yra mažesnis, palyginus su Fenoskandijos skydu (1.1.1 pav.). Iš kitos pusės Rytų Baltijos regioną lyginant su kitomis beveik aseismiškomis Rytų Europos platformos teritorijomis, galima pastebėti, kad ši sritis išsiskiria didesniu seisminiu aktyvumu (1.1.2 pav.).

Baltijos regionas klasifikuojamas kaip mažo ar labai mažo seisminio aktyvumo sritis (1.1.1 ir 1.1.2 pav.). Negausiuose istoriniuose rašytiniuose šaltiniuose yra minimos tik kelios dešimtys silpnų ar vidutinio stiprumo įvykių. Vietinių seisminių stočių tinklas Rytinėje Baltijoje iki paskutinio dešimtmečio buvo labai retas, buvo įsteigtos tik kelios seisminės stotys, kurios veikė su pertrūkiais. Tik po 2004 m. Kaliningrado srityje įvykusių dviejų vidutinio stiprumo žemės drebėjimų, regione buvo įrengtos penkios plataus diapazono seisminės stotys ir keletas trumpo periodo seisminių stočių. Todėl instrumentinė seismologinė informacija yra gana skurdi. Nagrinėjant regiono seismingumą dažnai naudojami duomenys užregistruoti, Fenoskandijoje esančių seisminių stočių. Deja, Fenoskandijos seisminės stotys registruoja tik stipresnius nei $M = 2,5$ magnitudės seisminius įvykius, o jų lokalizacijos paklaidos vidutiniškai siekia 50 km, o kartais nuokrypiai būna ir šimtai kilometrų (A. Pačėsa, 2000 nepublikuota ataskaita, LGT fondai, Nr. 5329).



1.1.1 pav. Šiaurės Europos seismingumas pagal Helsinkio Universiteto Seismologijos Instituto (HUSI) katalogus. Pavaizduoti instrumentiškai registruoti seisminiai įvykiai nuo 1965 m. iki 2009 m¹.

Seniausias žinomas seisminis įvykis Rytinės Baltijos regione paminėtas Petro Dusburgiečio kronikoje (Dusburgietis, 1985), kurioje aprašomas Prūsijoje 1303 metais vykęs žemės drebėjimas: „...*Tų pačių metų rugpjūčio 8 d., apie trečią valandą visoje Prūsijoje drebėjo žemė. Tris kartus suvirpėjo žemė drauge su pastatais, kurių retas išliko nesugriuvęs. Ką reiškė šis antgamtiskas žemės drebėjimas paaiškės vėliau.*“ Šis pranešimas negali būti

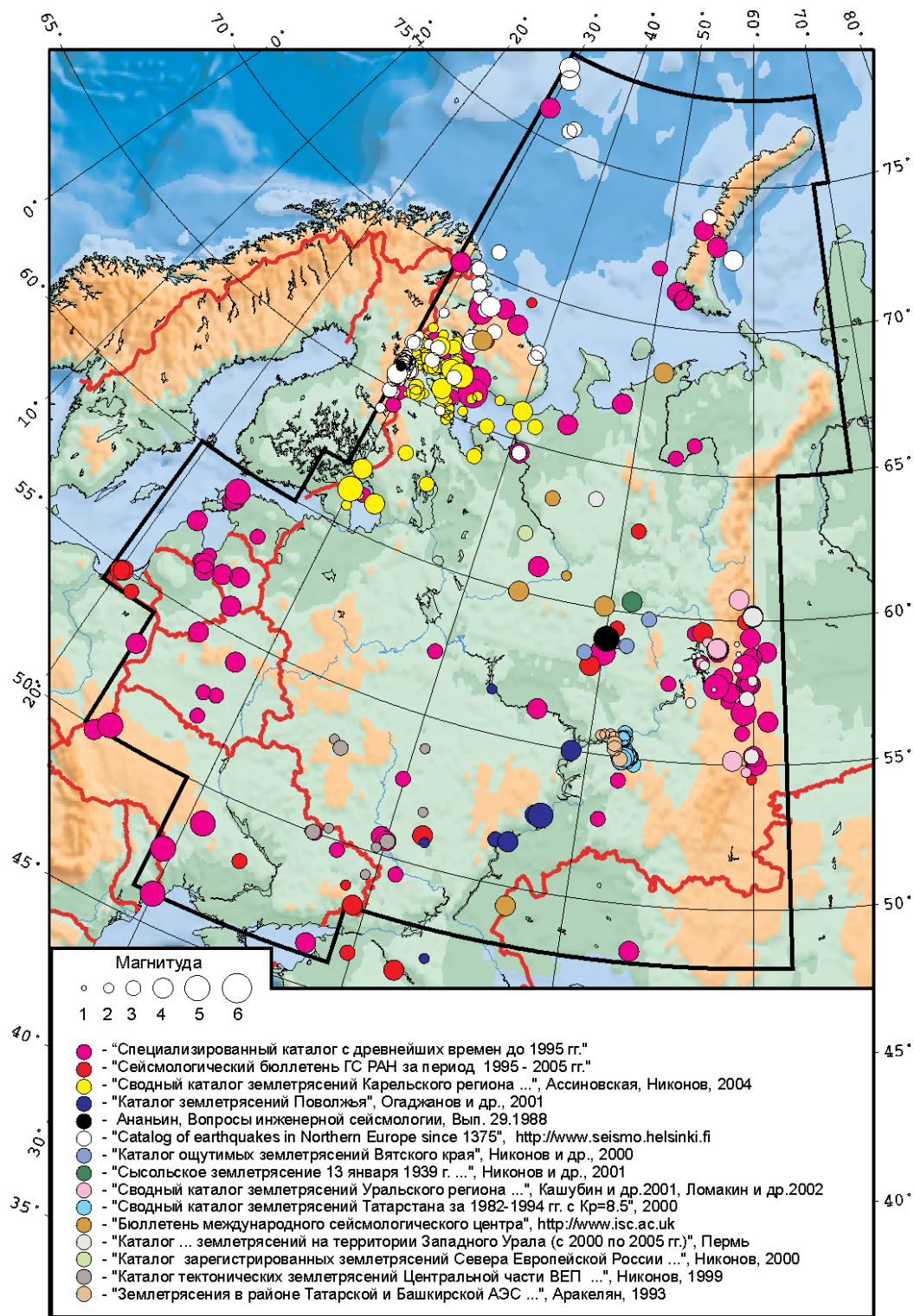
¹ <http://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/instrumap.html>, žiūrėta 2013.09.05.

vertinamas vienareikšmiškai. Autorius mini didelį skaičių sugriuvusių namų, tačiau nepateikia jokių detalių, neužsimena apie žmonių aukas. Beje, kaip tik tą pačią dieną 3 val. 30 min. UTC laiku įvyko vienas iš stipriausių žinomų žemės drebėjimų Viduržemio jūros regione – intensyvumas epicentre buvo $I_{\max} = XI$, o magnitudė galėjo siekti $M \sim 8,0$ (Guidoboni, Comastri, 1997). Mažai tikėtina, tačiau galbūt Prūsijoje galėjo jaustis šio drebėjimo atgarsiai (galima pastebėti, kad įvykio laikas Kretos saloje ir Prūsijoje gana artimai sutampa) arba Prūsijos metraštininkas galėjo „perkelti“ katastrofinius Viduržemio jūros pakrančių sugriovimų vaizdus į Pietrytinę Baltiją. Paminėtina, kad Dusburgietis buvo linkęs to meto įvykius aprašinėti tendencingai, išaukštindamas Kryžiuočių ordiną ir menkindamas baltišką gentis (Dusburgietis, 1985; p. 49-52), ir mistifikuoti daugelį aprašytų įvykių. Dusburgiečio metraštyje buvo aptikti 52 paminėjimai įvairių regėjimų, stebuklų ar neįtikėtinų reiškinių.

Tame pačiame Petro Dusburgiečio metraštyje randama pranešimų dar apie du žemės drebėjimus.

Dalis IV, skyrius 16, Apie tai, kaip Burgundijoje dėl žemės drebėjimo kalnas nuslinko į kitą vietą: „1225 viešpaties metais Burgundijoje, Druskos kalnuose, vienas kalnas dėl žemės drebėjimo atsiskyrė nuo kitų kalnų ir nuslinko prie kalnų kitoje pusėje, užvertė visą slėnį ir nuslėgė penkis tūkstančius žmonių (Ptol. 21,26; Mart. p. 400)“

Papildymas, skyrius 5, Dar apie tą patį: „1328 viešpaties metais niekur kitur, o šioje pilyje (Kristmemelio) taip siaubingai sudrebėjo žemė, kad grėse pavojus, jog gali sugriūti aukštesni pastatai, o tie, kurie buvo pastatuose, jau rengėsi, vengdami mirties šokti žemyn.“



1.1.2 pav. Rytų Europos platformos seisminis aktyvumas nuo 1467 iki 2005 m. (Шаров Н. В. и др., 2007). Skirtingo dydžio apskritimai žymi skirtingų magnitudžių seisminius įvykius, violetiniai apskritimai – įvykiai iš Specializuoto Šiaurinės Eurazijos žemės drebėjimų katalogo, apimančio laikotarpį nuo seniausių laikų iki 1995 m.², raudoni apskritimai – įvykiai iš Rusijos mokslų akademijos Geofizinės tarnybos 1995–2005 m. seismologinio biuletenio.

² <http://www.scgis.ru>, žiūrėta 2013.10.03.

Tikėtina, kad žemės drebėjimas 1225 m. Burgundijoje tikrai įvyko ir sukėlė didelę nuošliaužą, nors gana keista, kad apie tokį katastrofinį įvykį kituose šiuolaikiniuose šaltiniuose nerasta jokių žinių. Šiame pranešime gana tiksliai nusakomas ir žuvusių žmonių skaičius. Tuo tarpu 1328 m. drebėjimas Kristmemelio pilyje kelia daug abejonių. Kronikos autorius tiesiai nepasako, kas nutiko su Kristmemelio pilimi. Jis rašo „...*Be to, švento Petro grandinėse dieną (1328, rugpjūčio 1d.) buvo apleista Kristmemelio pilis, pastatyta brolio Karolio, magistro*“ (Papildymas, skyrius 3, Apie Kristmemelio pilies sugriovimą). Apie šios pilies sugriovimą galima suprasti tik iš skyriaus pavadinimo. Be to, autorius nenurodo, kas ir kaip tą pilį sugriovė. Tokį nenuoseklumą ar tendencingumą pastebėjo ir šiuolaikiniai istorikai. Lietuviškame Petro Dusburgiečio kronikos įvade (Dusburgietis, 1985; p. 51) rašoma: „*Dusburgiečio kronikoje nepaisoma ir kitų faktų. Pažymėjęs, jog kryžiuočiai 1328 m. vasarą apleido Kristmemelio pilį prie žemutinio Nemuno, jis nutyli, kad ją sunaikino lietuviai.*“ Galimai Dusburgietis, norėdamas nuslėpti ar sumenkinti šį pralaimėjimą, ir sukūrė du skyrius apie mažai tikėtinus įvykius, t.y. Papildymo 4 skyrių, „Apie tai, kaip iš anksto buvęs išpranašautas šis sugriovimas“, kur minimas nepaaiškinamas dangaus šviesulių judėjimas, ir 5 skyrių „Dar apie tą patį“, kur aprašomas žemės drebėjimas. Pagal drebėjimo aprašymą, žemės virpesiams galima priskirti apie V intensyvumo balus (EMS-98 skalė). Tokio intensyvumo žemės drebėjimas turėjo jaustis gana didelėje teritorijoje. Tačiau Petras Dusburgietis rašo, kad virpesiai buvo juntami tik Kristmemelio pilyje. Todėl manytina, kad drebėjimas buvo išgalvotas arba žemės virpesiai galbūt galėjo būti sukelti Nemuno šlaito nuošliaužos. Apie tokias nuošliaužas yra žinoma iš vėliau užfiksuotų faktų pvz., 1835 m. didesnė Rambyno kalno dalis, paplauta Nemuno, nugriuvo žemyn³. Nėra žinoma ir tiksliai Kristmemelio pilies vieta; Lietuviškame Dusburgiečio kronikos vertime ši pilis siejama su dabartiniu Skirsnemunės vietovardžiu ir rašoma: „...*Ordino pilis buvusi greičiausiai Maštaičių (Norkūnų) piliakalnyje kairiame Nemuno krante žemiau dabartinio*

³ http://lt.wikipedia.org/wiki/Rambyno_kalnas, žiūrėta 2013.09.07.

Gelgaudiškio, priešais Skirsnemunę. Greta piliakalnio išlikę keli įtvirtinti papiliai“ (Dusburgietis, 1985; p. 423). Tačiau paties Dusburgiečio tekste rašoma „1313 viešpaties metais, per Šv. Velykas, brolis Karolis, magistras, dievo bei jo motinos garbei ir šlovei, be to, norėdamas praplėsti krikščionių žemes, subūrė visą savo kariuomenę ir Nemuno pakrantėje, per šešias mylias aukščiau Ragainės, pastatė Kristmemelio pilį...“. Dar vienas neapibrėžtumas yra susijęs su mylios ilgiu, kurią naudojo Dusburgiečio amžininkai. Įvairiais laikais ir skirtingose vietose Vokietijoje buvo naudojamos gana skirtingo ilgio mylios, nuo 7415 m iki 10 000 m, tačiau dabar visuotinai priimta laikyti, kad vokiška mylia yra lygi 7500 m⁴. Todėl Skirsnemunės pilis turėjo stovėti per 45 km Nemunu aukščiau nuo Ragainės (dabartinio Nieman'o) ir būti kažkur ties dabartiniu Jurbarku, t.y., maždaug 7 km žemiau dabartinės Skirsnemunės.

Verta paminėti, kad dviejose Livonijos kronikose, parašytose Henriko Latvio ir Hermano iš Vartbergės (Latvis ir Vartbergė, 1991) ir aprašančiose tuos pačius laikus kaip ir Petro Dusburgiečio kronika, neminimas 1303 m. žemės drebėjimas Prūsijoje, nors, anot Dusburgiečio, drebant žemei, kad retas pastatas išliko nesugriautas, virpesiai turėjo būti gana gerai juntami ir Livonijos žemėse.

Skirtingų tyrinėtojų požiūriai į šiuos žemės drebėjimų aprašymus skiriasi. Tyrinėtojai iš Vokietijos išanalizavo kitus XIV a. šaltinius, juose nerado jokių užuominų apie Prūsijos drebėjimus ir priėjo prie išvados, kad yra didelė tikimybė, jog tokių drebėjimų nebuvo, o Petro Dusburgiečio pranešimai apie neva vykusius drebėjimus buvo susiję su to meto istoriniais neramumais ir karinėmis-politinėmis realijomis (Grunthal G. and P. Riedel, 2007). Tuo tarpu A. Никонов taip pat remiasi loginėmis prielaidomis ir įrodinėja, kad žemės drebėjimai 1303 m. ir 1328 m. tikrai įvyko (Гарецкий и Несмеянов, 2009). A. Nikonov netgi nustatė seisminių įvykių koordinatas bei įvertino jų magnitudes.

⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/German_obsolete_units_of_measurement, žiūrėta 2013.09.07.

Atsižvelgiant į aukščiau išdėstytus faktus, sudarant suvestinį seisminį regiono katalogą, šiame darbe nuspręsta pranešimus apie žemės drebėjimus Prūsijoje XIV a. laikyti nepagrįstais.

XIX a. pabaigoje – XX a. pradžioje Rygos universiteto profesorius B. Doss iš įvairių šaltinių surinko duomenis apie 18 vidutinio stiprumo (V–VII balų intensyvumas pagal MSK-64 skalę) žemės drebėjimų, vykusių Latvijos ir Estijos teritorijose (Doss, 1898; 1905a; 1905b; 1909a; 1909b; 1911; 1915). Jo sudarytas katalogas apėmė 1616–1911 m. Galima paminėti keletą stipresnių drebėjimų, kuriuos sukatalogavo B. Doss. 1616 m. birželio 30 d. tarp 7 ir 8 val. ryto Žiemgaloje (istorinė sritis Latvijos pietuose apimanti Bauskės ir Jelgavos apskritis) įvyko VI-VII balų intensyvumo drebėjimas. Šiuos įvykius aprašė dvaro pamokslininkas Georgas Marcellius (Doss, 1909a). Pranešime minima, kad drebėjimą jautė žmonės ir gyvuliai, esantys lauke, Žemės gelmėse buvo girdėti gaudesys kaip griaustinio. Žemės drebėjimas buvo jaučiamas beveik 100 000 km² plote, Biržų-Pasvalio-Bauskės trikampyje (Sakalauskas, 1977). 1821 m. sausio 23 d. Koksene (Latvija) miestelyje požeminiai smūgiai vertinti VI balais. Drebėjimo metu skambėjo varpai, griaustinio garsas, žmonės vertė iš kojų, stipriai supo. 1827 m. rugsėjo 28 d. Estijoje, į šiaurę nuo Haapsalu miesto užfiksuotas VI balų drebėjimas. Pranešta, kad buvo juntami smūgiai, braškėjo grindys, nuo suolo nukrito vaikas. 1908 m. sausio 29 d. Daugpilio (Latvija) apylinkėse registruotas VII balų intensyvumo drebėjimas. Jo metu buvo girdimas triukšmas, panašus į patrankos šūvį, laukuose ir pievose atsirado 3-4 colių plyšys.

Po Pirmojo ir Antrojo Pasaulinių karų, praėjusių per Rytinės Baltijos teritorijas, ir stiprių socialinių-ekonominių sukrėtimų B. Doss surinkti duomenys kurį laiką buvo primiršti arba žinomi tik siauram tyrėjų ratui. Kaip savo straipsnyje pripažino seismologijos ir tektonikos specialistai A. A. Nikonov ir H. Sildvee, ilgą laiką tarybiniai seismologai tiek Estiją, tiek visą Rytų Baltijos regioną laikė visiškai aseismišku, o savo darbus koncentruodavo į labai seismiškai aktyvius regionus (Nikonov and Sildvee; 1991). Lietuvos tyrėjai Lietuvos teritoriją taip pat laikė visiškai aseismiška, kur nevyksta

vietiniai drebėjimai ir kur tik kartais juntami regioninių žemės virpesių atgarsiai (Gudelis, 1958; Kristapavičius, 1964).

Todėl 1976 m spalio 25 d. tiek specialistams, tiek ir visuomenei netikėtai Osmusarės salą Estijoje sukrėtė vienas stipriausių regione $M = 4,7$ magnitudės (VI-VII MSK-64 balų intensyvumo epicentre) žemės drebėjimas (Slunga R. 1979; Nikonov and Sildvee, 1991). Be to, 1977 m. kovo 4 d. įvyko galingas $M = 6,9$ magnitudės drebėjimas Vrančos kalnuose (Rumunija). Jis buvo jaučiamas didelėje Rytų Europos platformos dalyje, o Rytinės Baltijos teritorijoje virpesiai vertinti III - IV balų intensyvumu (Никонов, 2006). Po šių įvykių susidomėjimas Rytinės Baltijos teritorijų seismingumu padidėjo. Taip 1988 m. Baltarusijos ir Baltijos respublikų tyrėjai naujai atrado B. Doss'o katalogus, išplėtė jo katalogo geografinę aprėptį ir papildė naujais seisminiais įvykiais iki keturiasdešimt penkių (Авотиня и др., 1988). Po poros metų katalogas buvo dar kartą peržiūrėtas, įvertintos kelių stipresnių įvykių magnitudės (Боборыкин и др. 1993). Šiame kataloge galima pastebėti seisminio aktyvumo padidėjimą visuose Baltijos kraštuose 1908 m. pabaigoje – 1909 m. pradžioje. Kai kurie tyrėjai šį seisminio aktyvumo padidėjimą bandė sieti su labai galingu Mesinos, kuris įvyko 1908 m. gruodžio 28 d. 05:20 UTC (Coordinated Universal Time – universalus laikas, Grviničo laikas) Mesinos mieste Italijoje. Šio drebėjimo magnitudė buvo įvertinta $M_w = 7,1$ ir jis laikomas vienu iš stipriausių kada nors užregistruotu Europoje (Nicola et al., 2009). Nors šis drebėjimas sukėlė labai didelių sugriovimų, žuvo virš 100 000 žmonių ir stiprūs požeminiai smūgiai buvo juntami net už 400 km nuo epicentro, tačiau yra netikėtina, kad šio drebėjimo atgarsiai galėjo pasiekti ir tiesiogiai būti jaučiami Rytų Baltijos regione. Viena vertus, Mesinos drebėjimo epicentro gylis buvo tik maždaug 9 km gylyje, o atstumas nuo Mesinos iki Rytų Baltijos regiono buvo apie 2200 km. Palyginimui galima paminėti, kad Vančo drebėjimų, kurių seisminės bangos sudrebina visą Rytų Europos platformą ir tikrai jaučiamos Rytų Baltijoje, epicentrus gylyai siekia nuo 100 iki 150 km (Шаров и др., 2007), o atstumas nuo epicentrus iki Rytų Baltijos regiono yra apie 1200 km. Taip pat seisminio aktyvumo padidėjimas Rytų

Baltijoje prasidėjo tik 1908 m. gruodžio 28 d. vakare ir tęsėsi dar tris dienas (Pačėsa and Šliaupa, 2011). Todėl galima spėti, kad 1908 m. Mesinos drebėjimas išprovokavo kontinentinio masto Žemės plutos įtampų persiskirstymą ir tai sukėlė trumpalaikį seisminio aktyvumo padidėjimą ir Rytų Baltijos regione.

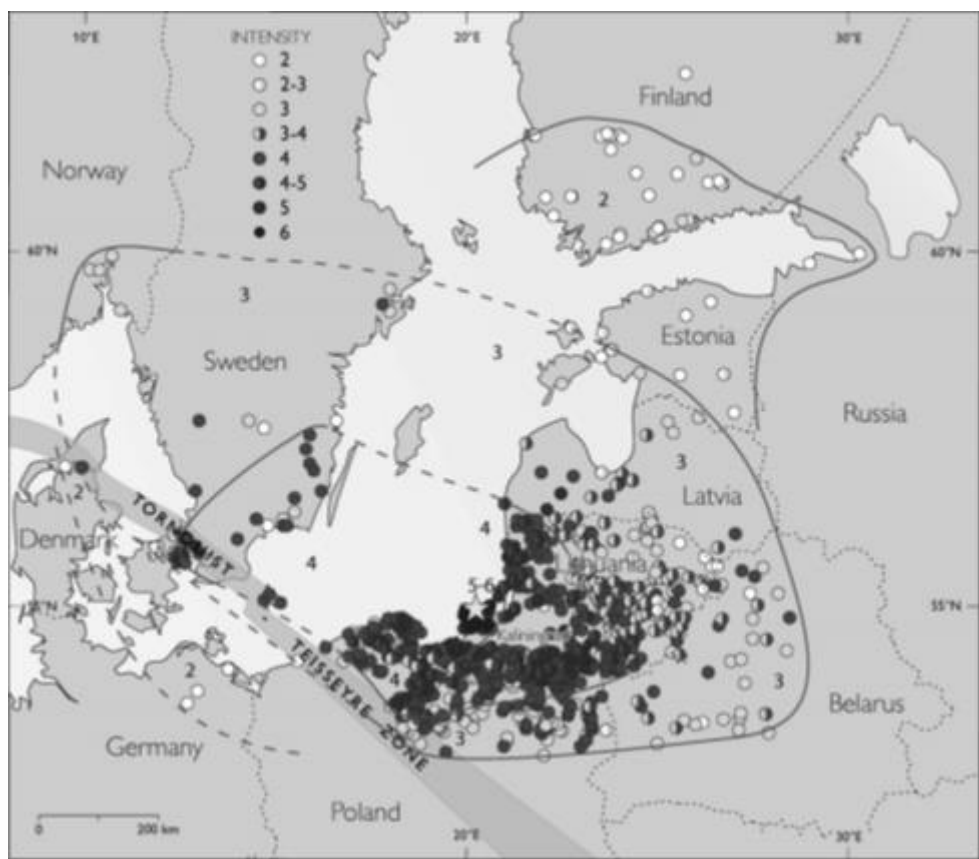
2004 metais rugsėjo 21 d. Kaliningrado srityje (Rusijos Federacija) įvyko du stiprūs Rytų Baltijos regionui drebėjimai, kurių magnitudės įvertintos $M_W = 5,0$ ir $M_W = 5,2$. Kitos seisminės agentūros pateikė kiek skirtingus magnitudžių skaičiavimus pvz.: EMSC (European Mediterranean Seismological Centre) $m_b = 4,4$ ir $m_b = 5,0$, NEIC (National Earthquake Information Centre) $m_b = 4,8$ ir $m_b = 4,9$ (Gregersen et al., 2007). Be dviejų pirmųjų smūgių užregistruotas ir trečias silpnėsnis pakartotinis smūgis (afteršokas), kurio magnitudė vertinta $M_L = 3,0$ (Gregersen et al., 2007).

Žemės drebėjimai Kaliningrado srityje suteikė gana unikalias galimybes seismologams surinkti daug vertingos makroseisminės informacijos, t.y. informacijos apie žemės virpesių sklidimą ir jų įtaką statiniams bei žmonėms šiame regione. Makroseisminė informacija atskirai buvo renkama pačioje Kaliningrado srityje ir gretimose valstybėse: Lietuvoje (Pačėsa ir kt., 2005), Lenkijoje (Guterch, 2009), Švedijoje, o taip pat Baltarusijoje, Latvijoje Estijoje, Danijoje ir Norvegijoje. Vėliau atskirose šalyse surinkta makroseisminė informacija buvo apjungta į vieną duomenų rinkinį ir sudaryti dviejų stipriausių Kaliningrado drebėjimų regioninio mastelio makroseisminiai žemėlapiai (Gregersen et al., 2007; 1.1.3 pav.). Makroseisminių duomenų vertinimui buvo naudota EMS-98 (Grunthal, 1998) intensyvumo skalė. Didžiausias abiejų stipresniųjų Kaliningrado drebėjimų intensyvumas buvo stebėtas Sambijos pusiasalio šiaurės-vakarinėje dalyje, beveik ties Baltijos jūros kranto linija (Ассиновская и др., 2008), kur jis siekė $I_0 = VI$ balus. Tolstant nuo epicentro virpesių intensyvumas mažėjo. Vakarų ir pietų kryptimi drebėjimų makroseisminis laukas apribotas Teisseyre-Tornquist zona (TTZ), ribojančia pietvakarinį Rytų Europos platformos pakraštį. Toliausiai šių drebėjimų virpesiai buvo juntami net už ~800 km Norvegijos sostinėje Osle ir

už ~840 km. viršutiniuose daugiaaukščių pastatų aukštuose Sankt-Peterburge Rusijoje (Ассиновская, 2008; 1.1.3 pav.).

Daugiausia Kaliningrado žemės drebėjimai žalos padarė arčiausia epicentru – pačioje Kaliningrado srityje. Čia vienas žmogus mirė nuo infarkto, 20 žmonių buvo stipriai sužaloti krentančių daiktų, buvo apgadinta apie 2100 pastatų ir visa padaryta materialinė žala buvo įvertinta 5 mln. JAV dolerių (Ассиновская и др., 2008). Lenkijoje makroseisminis intensyvumas buvo įvertintas mažiau kaip V balais, buvo apgadinta kelios dešimtys pastatų (Ассиновская и др., 2008). Lietuvoje arčiausiai Kaliningrado srities esančiose vietovėse, pvz. Šilutės sav., Kuršių nerijos sav. ir Klaipėdos mieste atskirose vietose buvo užfiksuotas V balų makroseisminis intensyvumas. Tačiau iš esmės Lietuvos pietvakarinė dalis buvo paveikta VI intensyvumo balų virpesių, vidurio Lietuva – III balų, o šiaurės-rytinis šalies pakraštys – II intensyvumo balų virpesių (Pačėsa ir kt., 2005). Apytikriais vertinimais Lietuvoje buvo nežymiai pažeista iki kelių dešimčių pastatų (Ассиновская и др., 2008; Pačėsa ir kt., 2005; A. Pačėsa, 2005 nepublikuota ataskaita, LGT fondai, Nr. 8221). Tolimesniuose nuo Kaliningrado drebėjimų regionuose makroseisminis intensyvumas buvo dar mažesnis ir žalos nepadarė.

Dėl to, kad regione žemės drebėjimų metu buvo retas seisminių stočių tinklas ir seisminės stotys buvo įrengtos gan toli, skirtingos seismologijos agentūros pateikė skirtingas abiejų žemės drebėjimų lokalizacijas, kurios skyrėsi per kelias dešimtis kilometrų. Žemės drebėjimai buvo instrumentiškai lokalizuoti 16–20 km gylyje po centrine-šiaurine Sambijos pusiasalio dalimi Kaliningrado srityje. Buvo įvertinta, kad remiantis makroseisminiais skaičiavimais šių įvykių epicentru gylis buvo 10–19 km, kas gana gerai atitiko instrumentiškai apskaičiuotus epicentru gylius. Žemės drebėjimo mechanizmas, dėl kurio kilo drebėjimas, buvo apibrėžtas kaip horizontalus dešinysis stūmis VŠV–RPR kryptimi. Beveik vertikaliame lūžyje įvyko poslinkis lygiagrečiai šiaurinės Sambijos pusiasalio pakrantės. Istorinė informacija apie anksčiau šiame regione galėjusius vykti seisminius įvykius – labai skurdi (Gregersen et al., 2007).



1.1.3 pav. Antrojo (2004 m. rugsėjo 21 d., 13:32 UTC, $M_w = 5,2$) Kaliningrado srityje įvykusio žemės drebėjimo makroseisminis žemėlapis. Intensyvumai pateikti EMS-98 skalėje (pagal Gregersen et al., 2007).

Osmusarės ir Kaliningrado žemės drebėjimai įtikino, kad būtina keisti ankstesnį požiūrį į Rytų Baltijos regiono seismingumą. Buvo manoma, kad stipriausi žemės drebėjimai šiame regione gali siekti $M = 4,8$, bet Kaliningrado įvykiai parodė, kad šiame regione vyksta ir iki $M = 5,2$ stiprumo drebėjimai; įskaičius dažniausiai mažai seismiškai aktyviems regionams taikomą 0,5 magnitudės paklaidą (pvz. dePolo and Slemmons, 1990; Chen and Scawthorn, 2003), žemės drebėjimai Rytų Baltijos regione gali siekti $M = 5,7$ magnitudę.

Pagal seisminio aktyvumo žemėlapius (1.1.1 ir 1.1.2 pav.), galima pastebėti, kad didesnioji seisminių įvykių dalis registruota Latvijos ir Estijos teritorijose. Lietuvos teritorijoje patikimai nėra užfiksuoto nei vieno žemės drebėjimo epicentro. Yra žinoma, kad 1909 m. gruodžio 28 d. buvo sudrebintos Gudogų geležinkelio stoties apylinkės (dabartinė Baltarusijos teritorija; rus.: Гудагай), esančios už kelių dešimčių kilometrų nuo Vilniaus.

Šio drebėjimo intensyvumas epicentre siekė V balus (pav. 1.1.2). Toks netolygus seisminių įvykių pasiskirstymas Rytų Baltijos regione suponavo mintį, kad Lietuvos teritorijoje taip pat galėjo būti istorinių žemės drebėjimų, tačiau niekas iki dabartinių laikų jų neieškojo ir nekatalogavo. Ieškoti informacijos apie galimai Lietuvoje buvusius žemės drebėjimus per visą rašytinę istoriją, t.y. nuo XIII a. iki šių dienų yra sunkiai įgyvendinamas uždavinys. Tačiau tokios informacijos paieška lietuviškuose spaudiniuose, kurių leidyba prasidėjo tik 1873 m. įmanoma, tekstai prieinami Lietuvos bibliotekose ir daliai lietuviškų periodinių leidinių yra sudaryti periodinių spaudinių sąvadais. G. Žaludienė sudarė ankstesnių seisminių įvykių duomenų sąvadą remiantis lietuviškais periodiniais leidiniais (Žalūdienė ir Katinas, 2013; G. Žalūdienė, 2011, nepublikuota ataskaita, LGT fondai, Nr. 20154). Sąvade nuodugniai sukataloguoti pranešimai apie vietinius, regioninius ir tolimus žemės drebėjimus, taip pat buvo sudaryti ir retesnių gamtos reiškinių tokių kaip meteoritų kritimai, upių krantų nuošliaužos bei smegduobių susidarymo pranešimų sąvadais. Galima daryti išvadą, kad tiek carinės Rusijos laikotarpiu (iki 1918 m.), tiek nepriklausomos Lietuvos laikotarpiu (nuo 1918 iki 1940 m.) tuometinė žiniasklaida fiksuodavo retesnius gamtos reiškinius. Todėl galima manyti, kad jeigu Lietuvos ar gretimose teritorijose būtų vykęs juntamas žemės drebėjimas ($M \geq 3$), jis būtų aprašytas. Galima paminėti šiuos svarbesnius faktus išdėstytus G. Žaludienės sąvade, kuriuos galima interpretuoti:

1. Surasti aštuoni pranešimai apie juntamus virpesius Kaliningrado srities teritorijoje, vakarų ir vidurio Lietuvoje, kurie buvo sukelti 1904 m. spalio 23d. Oslo fiordo $M_S = 5,4$ drebėjimo (Bungum et al., 2009). Iš atrastų pranešimų galima vertinti, kad Oslo fiordo drebėjimo virpesiai vakarų Lietuvoje ir Kaliningrado srityje buvo III-IV balų (EMS-98). Tuo tarpu, pagal H.Bungum ir kitų Šiaurės šalių tyrėjų sudaryto makroseisminio žemėlapiu duomenis, šioms teritorijoms buvo priskirti tik II intensyvumo balai.

2. Surastas iki šiol plačiau nežinotas dr. Jono Basanavičiaus pranešimas apie 1906 m. balandžio 22 d. jo asmeniškai ir kelių kitų žmonių Kauno mieste jaustą žemės drebėjimą (Basanavičius, 1906). Jis rašė „...*Jisai (žemės drebėjimas) aplankė ir mūsų Lietuvą, būtent nedelioje, 9 (22) Balandžio Kaune keli žmonės (Mik. ir Jonas Bartaikai, Peterburgo viešbutyje) jį labai aiškiai patėmiję. Tarp kitų ir rašantysis šituos žodžius, kurs ilgus metus pietų krašte gyvendamas, prie žemės drebėjimų pripratęs buvo, valandą 3 min. 35 po pietų, gulėdamas labai aiškiai girdėjo po visais mūro namais kokias 2-3 sekundas duruojantį dundėjimą ir visų namų drebėjimą, tarytum, iš pietų šiaurės link einantį ir patėmijo žibinte stovinčios ilgos žvakės svyravimą (osciliaciją). Dar aiškiau tėmyti drebėjimą teko dviem laivūnam. Jiedu (Mateušas Kručkauskas ir jo draugas (vardas nežinomas)) savo laivą prišakiu ant nuožulnaus akmenimis išgrįsto, Nemuno kranto biskelį ištraukę, jame sėdėję ir nemažai nusigandę girdėdami, pirmą kart savo gyvenime, tokį nepaprastą žemės dundėjimą ir pamatę, kad jujų laivas, tarytum, pats umai nuo kranto vandens link atšoko. Šitokį trumpą žemės drebėjimą galėjo geriausiai patėmyti tik tie, kurie muriniuose aukštuose namuose gyveno; kaimuose vargu kas gavęs progą jį pajusti.“. Pats autorius justus virpesius siejo su 1906 m. balandžio 18 d. $M_w = 8,2$ San-Francisko žemės drebėjimu. Pastarojo drebėjimo atgarsiai negalėjo būti jaučiami Lietuvoje dėl didelio atstumo nuo epicentro. Be to, J. Basanavičiaus aprašomi virpesiai pajauti balandžio 22 d., t.y. net po keturių dienų po San-Francisko žemės drebėjimo. Jokių žinių apie drebėjimus tą dieną nerandama nei Šiaurės Europos istorinių seisminių įvykių kataloge⁵ nei ISC kataloge⁶. Dėl šių faktų ir trumpos virpesių trukmės (2–3 sekundės) galima manyti, kad tai buvo vietinis žemės drebėjimas. Pagal aprašymą jo intensyvumas*

⁵ http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog_northeurope.html, žiūrėta 2013.09.20.

⁶ <http://www.isc.ac.uk>, žiūrėta 2013.09.20.

atitinka III balus (EMS-98), o pagal visuotinai priimtą sąryšį galima apskaičiuoti seisminio įvykio magnitudę $M_L = 3,0$.

3. Lietuviškoje spaudoje surasti keturi iki šiol nežinoti pranešimai apie 1908 m. gruodžio mėn. 28 d. $M_L = 4.5$ žemės drebėjimą Gudogų geležinkelio stoties apylinkėse (dabartinė Baltarusijos teritorija; rus.: Гудагай). Anksčiau šis drebėjimas buvo žinomas tik iš dviejų žinučių publikuotų lenkiškame laikraštyje „Kurjer litewski“ (1909. No. 11 (22)) ir baltarusių kalba leistame žurnale „Наша ніва“ (1909.01.15 (28)). Iš lietuviškų pranešimų sužinome naujus faktus, kad drebėjimas buvo jaučiamas Vilniaus gubernijos Vileikos ir Ašmenos apskrityse ir kad kai kuriose vietose sudužo langų stiklai.
4. Surasti keturi iki šiol nežinoti pranešimai apie keletą silpnų žemės drebėjimų vykusių dabartinės Kaliningrado srities teritorijoje nuo 1908.12.28 iki 1909.01.05. Anksčiau apie šiuos įvykius žinota tik iš B. Doss tyrinėjimų (Doss, 2011).
5. Surastas vienas iki šiol nežinotas pranešimas apie virpesius Troškūnų km., Ukmergės pavieta. Laikraščio „Vilniaus žinios“ (1909.02.25 Nr.42) žinutėje rašoma „*Traškūnuose (Ukmergės pavietas). Vasario 3 d. (naujas stilius – vasario 16 d.) devintoje val. vakaro girdėjosi per vieną sekundą trys vienodi atbalsiai, panašūs į tolimą griausmą, nuo kurių langų stiklai sudrebėjo. Gal tai nuo žemės drebėjimo*“. Aprašytus virpesius būtų galima vertinti ~IV intensyvumo balais (EMS-98). Tačiau šis vienas pranešimas nėra pakankamai informatyvus, kad būtų galima jį susieti su vietiniu tektoniniu žemės drebėjimu.
6. Surastas iki šiol nežinotas pranešimas apie „žemės drebėjimą“ Klaipėdoje. Seinuose (priklausė Rusijos imperijai) leistas žurnalas „Šaltinis“ (1913. 07.24 Nr. 26) išspausdino labai trumpą žinutę „*Klaipėdoje, rašo 14 birželio (naujas stilius – birželio 1 d.) buvęs jaučiamas lengvas žemės drebėjimas, tęsuisis 2 sekundi*“. Galima suprasti, kad tai iš kito leidinio perspausdinta žinutė, tačiau nenurodoma iš kokio. Gana keista, kad jokių pranešimų apie

drebėjimus Klaipėdoje nebuvo surasta to meto Rytų Prūsijoje leistuose lietuviškuose leidiniuose. Ši vieniša žinutė nėra pakankamai informatyvi ir patikima, kad ją būtų galima sieti su vietiniu tektoniniu žemės drebėjimu.

7. Surasti keli šviečiamojo pobūdžio straipsneliai pvz. „Žemės drebėjimas Lietuvoje“ („Vilniaus žinios“, 1906.04.18, nr. 81), „Žemės drebėjimas baisi nelaimė“ („Mūsų kraštas“ 1938.02.11, nr. 6) ar atskiros knygelės pvz. „Apie Žemės vidurius“ (Tilžė, 1896) pasakojantys apie vulkanizmą, galingus istorinius žemės drebėjimus, žemės drebėjimų ir vulkanizmo priežastis. Visuose tokio pobūdžio tekstuose sakoma, kad Lietuvoje žemės drebėjimai vyksta labai retai ir minima, kad žemės drebėjimo Lietuvoje būta 1303 m. Daugiau jokių konkretesnių žinių apie drebėjimus nepateikiama, nors ir neatmetama galimybė, kad vėlesniais amžiais Lietuvos teritorijoje galėjo būti tolimų drebėjimų atgarsių („Vilniaus žinios“, 1906.04.18, nr. 81). Tai parodo, kad tokių tekstų autoriai nei patys, nei matomai jų tėvai nebuvo jautę žemės drebėjimų virpesių Lietuvoje. Kita vertus yra keista, kad buvo pamiršti 1905 m. Oslo fiordo drebėjimo atgarsiai ar 1908 m. pabaigos ir 1909 m. pradžios keletas nestiprių smūgių.

1.2. STIPRIŲ UŽREGIONINIŲ ŽEMĖS DREBĖJIMŲ POVEIKIS RYTŲ BALTIJOS REGIONUI

Beveik visą Rytų Europos platformą, tuo pačiu ir joje esantį Rytinės Baltijos regioną, vidutiniškai 3–4 kartus per šimtmetį sudrebina stiprūs žemės drebėjimai, kurių epicentrai koncentruojasi Vrančos kalnų (Rumunija) seimogeninėje zonoje (SZ). Ši zona yra toje vietoje, kur Karpatų kalnų kalnagubris keičia savo kryptį iš pietryčių į pietvakarių ir pietų. Paskutiniai stiprūs žemės drebėjimai čia vyko 1940, 1977, 1986 ir 1990 metais. Rumunijoje ir gretimoje Moldovoje šie drebėjimai sukėlė ženklus pastatų

sugriovimus, o 1940 ir 1977 m. drebėjimai paženklinoti ir žmonių aukomis. Duomenys apie stipriausius Vrančos SZ drebėjimus vykusius per praėjusius 1000 metų pateikti 1.2.1 lentelėje (Шаров Н. В. и др., 2007).

Detalus Vrančos SM geologinės sandaros aprašymas yra pateiktas (Чекунов, 1986). Fokalinis SZ tūris gana nedidelis: 75x50x25 km (Сагалова, 1987). Sudarytas katalogas (Кострюк и др., 1997) ir drebėjimų pasikartojamumo grafikai (Кендзера и др., 1995).

Pats stipriausias iš žinomų Vrančos SZ drebėjimų įvyko 1446 m., magnitudė siekė $M = 7,6$ (Kondradskaya and Shebalin, 1982). Panašus drebėjimas įvyko ir 1802 m., magnitudė $M = 7,4$. Yra žinoma, kad per visą antrą tūkstantmetį Vrančos SZ įvyko 28 griaunamojo pobūdžio žemės drebėjimų, kai intensyvumas epicentrinėje zonoje buvo VIII ir daugiau balų. Daugelis tyrinėtojų (pvz.: Борисов и Рейснер, 1976; Кендзера и др., 1995; Кутас и др., 2001) bandė įvertinti maksimaliai galingo Vrančos SZ drebėjimo magnitudę. Pagal šių tyrinėjimų rezultatus maksimali magnitudė M_{\max} gali būti nuo 7,4 iki 7,8, o pagal Mantiniemi et al. (2003) čia M_{\max} gali siekti 8,0. Moldovos tyrėjas Šumiloj tikimybiškai įvertino maksimalių Vrančos SZ drebėjimų pasikartojamumą. Jis nustatė, kad maksimalaus drebėjimo $M_{\max} = 7.2$ tikimybė yra $P = 10^{-2}$, o $M_{\max} = 7,8$ tikimybė yra $P = 10^{-4}$ (Соллогуб и др., 1985).

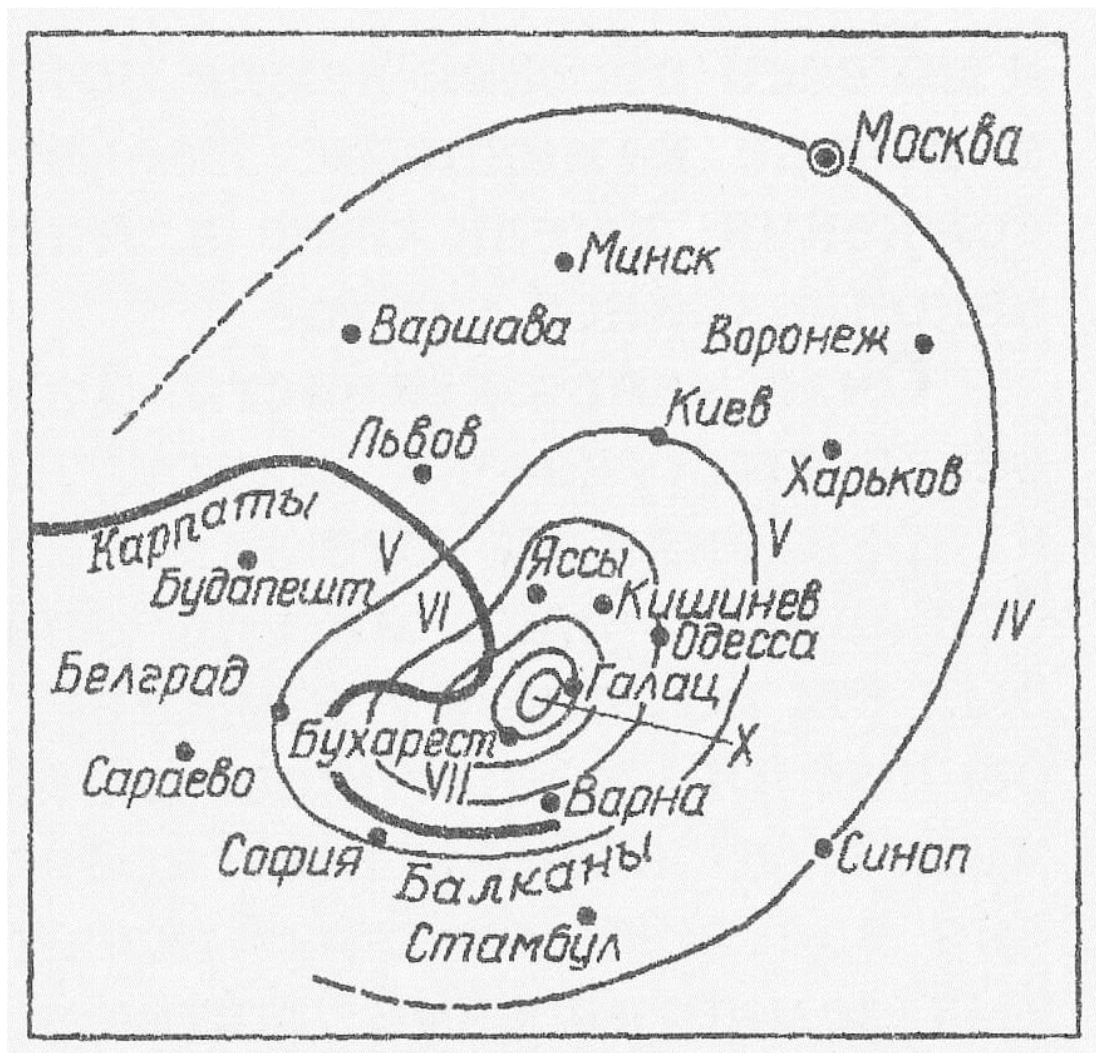
Vrančos drebėjimų ypatumas yra didelis drebėjimo židinių gylis. Stipriausių drebėjimų židinių gyliai paplitę nuo 110 iki 150 km (Ризниченко и др., 1980). Toks židinių gylis sąlygoja, kad galingi drebėjimai sukelia sugriovimus didelėje teritorijoje, o silpnesni virpesiai juntami didelėje Rytų Europos platformos dalyje. Be to, šių drebėjimų intensyvumo laukai charakterizuojami gana dideliu asimetriškumu. Daugelio drebėjimų izoseistos yra išstetos šiaurės-rytų kryptimi. Vrančos drebėjimus žmonės jaučia labai didelėje teritorijoje: nuo Graikijos pietuose iki Suomijos šiaurėje ir nuo Vokietijos vakaruose iki Europinės Rusijos dalies rytuose (Шаров Н. В. и др., 2007).

Rytinės Baltijos regioną taip pat pasiekia galingų Vrančos SZ drebėjimų virpesiai (Никонов, 2006; 1.2.1 pav.). 1940 m. drebėjimas ($M = 7,3$) pietinėje Rytų Baltijos regiono dalyje sukėlė V balų, o šiauresnėje regiono dalyje IV balų intensyvumo virpesius. 1977 m. Vrančos drebėjimas ($M = 6,9$) pietrytinę Rytų Baltijos regiono dalį sukrėtė IV balų intensyvumu o šiaurinę – III ir II balų intensyvumu. 1977 ($M = 6,9$), 1986 ($M = 6,8$) ir 1990 ($M = 6,6$) m. Vrančos regiono drebėjimai Lietuvoje buvo juntami III – VI intensyvumo balų stiprumu (Suveizdis et al., 1994). Lietuvoje buvo išplatintos ir vėliau surinktos atitinkamos makroseisminių pasireiškimų anketos. Jų pagrindu minėto tyrimo autoriai sudarė 1977 m. Vrančos drebėjimo sukeltų virpesių Lietuvoje makroseisminį žemėlapi, kuriame izoseisminės linijos išsidėstė netaisyklingos formos koncentrinėmis zonėmis, o didžiausia intensyvumo vieta sutapo su Kėdainių miestu, kur virpesių intensyvumas buvo vertintas $I = 4,5$. Šio tyrimo autoriai iškėlė mintį, kad Vrančos drebėjimo virpesiai sužadino vietinę SZ, įvyko vietinis žemės drebėjimas Kėdainių raj. greta Kėdainių, ko pasekoje čia ir buvo užfiksuotas didžiausias intensyvumas Lietuvoje. Tačiau į Suveizdžio ir kitų (1994) tyrimą ir jų mintį apie galimą vietinį žemės drebėjimą reikėtų žiūrėti gana kritiškai. Visų pirma buvo nagrinėjamos anketos gautos tik iš Lietuvos teritorijos ir visiškai neturėta jokios informacijos apie makroseisminius pasireiškimus už Lietuvos teritorijos ribų. Taip pat egzistuoja natūralios gyventojų tankumo ir socialinio aktyvumo tendencijos einant nuo šalies centrinių dalių link pasienio, į kurias panašu kad nebuvo atsižvelgta. Taip pat Suveizdžio ir kitų (1994) pateiktas makroseisminis žemėlapis neatitinka makroseisminio žemėlapio sudaryto visai Rytų Europos platformai (Никонов, 2006).

Seismologijoje Žemės drebėjimai pagal nuotolį yra skirstomi į tris kategorijas: lokalius, regioninius ir tolimus arba teleseisminius⁷. Lokalūs drebėjimai yra tokie, kurių epicentras nuo bent vienos seisminio tinklo stočių yra nutolęs ne toliau negu ~700 km. Regioniniai drebėjimai yra tokie, kurių epicentras nuo seisminio tinklo tolimesnis negu ~700 km, bet artimesnis negu

20° (~2200 km) ir tolimi drebėjimai yra tokie, kurių epicentrai nuo seisminio tinklo stočių yra nutolę toliau negu 20° (>2200 km).

Šiame darbe apibudinant tiriamą teritoriją dažnai naudojamas terminas Rytų Baltijos regionas. Tuo tarpu Vrančos SZ vykstantys Žemės drebėjimai formaliai turėtų būti įvardijami kaip regioniniai Rytų Baltijos teritorijos atžvilgiu (atstumas nuo Vrančos SZ iki Rytų Baltijos regiono vidurio yra apie 1300 km). Kad išvengti galimų dviprasmybių, šiame darbe Vrančos žemės drebėjimai Rytų Baltijos teritorijos atžvilgiu yra vadinami užregioniniais.



1.2.1 pav. 1940 m. gruodžio 10 d. drebėjimo, kurio magnitudė $M = 7,3$ ir epicentras lokalizuotas Vrančos SZ, makroseisminė schema. Sudarytojas G. P. Gorškov (Никонов, 2006).

⁷ <http://www.norsardata.no/NDC/>, žiūrėta 2013.09.22.

1.2.1 lentelė. Pagrindiniai žemės drebėjimų parametrai, kurių epicentra buvo Vrančos kalnų zonoje ir kurių magnitudė buvo $M \geq 6.5$ (Шаров Н. В. и др., 2007).

Metai	Mėnuo	Diena	Platuma, °N	Ilguma, °N	Gylis, km	Magnitudė
984	-	-	45,70	26,60	-	6,8
1038	08	15	45,70	26,60	-	7,0
1107	02	12	45,70	26,60	150	6,9
1170	04	01	45,70	26,60	150	7,0
1196	02	13	45,70	26,60	150	7,0
1230	05	10	45,70	26,60	150	7,1
1258	02	07	45,70	26,60	150	6,9
1327	-	-	45,70	26,60	150	7,0
1446	10	10	45,70	26,60	150	7,6
1471	08	29	45,70	26,60	150	6,8
1516	11	24	45,70	26,60	150	6,7
1523	06	09	45,70	26,60	150	7,0
1545	07	09	45,70	26,60	150	6,9
1569	08	17	45,70	26,60	-	6,0
1590	04	30	45,70	26,60	-	7,0
1595	04	21	45,70	26,60	150	6,9
1604	05	03	45,70	26,60	-	6,5
1606	01	13	45,70	26,60	150	6,6
1620	11	08	45,70	26,60	-	7,3
1620	12	-	45,70	26,60	150	6,6
1637	02	01	45,70	26,60	150	6,6
1679	08	09	45,70	26,60	100	6,6
1681	08	18	45,70	26,60	150	6,7
1701	06	12	45,70	26,60	150	7,1
1738	06	11	45,70	26,60	150	7,0
1790	04	06	45,70	26,60	150	6,9
1802	10	26	45,70	26,60	150	7,4
1821	11	17	45,70	26,60	150	6,7
1829	11	26	45,70	26,60	150	6,8
1838	01	23	45,70	26,60	100	7,0
1893	08	17	45,70	26,60	100	6,6
1894	08	31	45,70	26,60	150	6,5
1908	10	06	45,80	26,50	150	6,8
1929	11	01	45,90	26,50	150	6,7
1934	03	29	45,70	26,50	150	6,8
1940	10	22	45,90	26,50	150	6,8
1940	11	10	44,80	26,80	150	7,3
1977	03	04	45,77	26,80	108	6,9
1986	08	30	45,54	26,31	137	6,8
1990	05	30	45,88	26,67	90	6,7
1990	05	31	45,86	26,77	89	6,6

1.3. RYTŲ BALTIJOS REGIONO INSTRUMENTINIŲ SEISMOLOGINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Estija

Pirmieji seismologiniai stebėjimai Tartu mieste pradėti 1896 m., kai Zöllner-Repsold-Levitski tipo horizontalus seismografas buvo įrengtas parako rūsiuose. Užsienyje pirktą aparatūrą buvo testuojama, tikrinamas jos tinkamumas naudoti kitose Rusijos seisminėse observatorijose. 1906 m. Pulkovo mieste buvo įrengta centrinė Rusijos seisminė observatorija, todėl 1912 m. Tartu seisminė stotis buvo uždaryta⁸.

Metrologijos observatorijos pastate, Liivi gatvėje, nuo 1931 iki 1939 m. buvo įkurta seisminė stotis. Be globalių ir regioninių žemės drebėjimų buvo registruoti ir vietiniai įvykiai⁹.

1987 m. Baltarusijos mokslų akademijos Geochemijos ir Geofizikos institutas Tartu metrologijos observatorijoje įrengė CM-3 tipo seismografą stebėti vietinį seismingumą. Po Tarybų Sąjungos žlugimo, seisminės stoties priežiūrą perėmė Estijos mokslų akademijos Geologijos institutas, tačiau 1993 m. geofiziniai tyrinėjimai buvo nutraukti ir nuo 1994 m. seisminę stotį prižiūrėjo Estijos geologijos centras. 1996 m. Tartu observatorijos rūsyje buvo įrengta moderni seisminė stotis Quantera Q380 (tarptautinis kodas TRTE), kuri buvo įjungta į GEOFON seisminių stočių tinklą palaikomą GFZ (GeoForschungsZentrum – Vokietijos geomokslų tyrimų centro). Dėl didelio miesto foninio triukšmo seisminės stoties aparatūra 2003 m. buvo perkelta į Vasulą vietovę, 15 km nuo Tartu (tarptautinis kodas VSU).

⁸ http://www.ajaloomuseum.ut.ee/vvebook/pages/10_1.html, žiūrėta 2014.02.20.

⁹ http://www.ajaloomuseum.ut.ee/vvebook/pages/10_2.html, žiūrėta 2014.02.20.

Apie 2000 m. jaunas specialistas baigęs fizikos mokslus Tartu universitete A. Heinloo pradėjo bendradarbiauti su Vokietijoje įsikūrusiu GFZ. Matomai todėl GFZ Estijoje įrengė keletą labai plataus diapazono seismologinių stočių: SRPE (Suurupi vietovėje, kuri veikė nuo 2005 iki 2011 m.), MTSE (Matsalu vietovėje, kuri veikia nuo 2005 m.) ir ARBE (Arbavere vietovėje, kuri veikia nuo 2011 m.). Estijos seismologinių stočių duomenis realiu laiku galima gauti per GFZ serverius.

Maždaug nuo 2005 m. Estijos geologijos tarnyboje pradėjo dirbti iš Suomijos kilusi ir nemažą seismologinio darbo patirtį įvairiose valstybėse turėjusi seismologė dr. H. Soosalu. Būtent ji ir apdoroja Estijoje esančių seismologinių stočių duomenis. Be to, tarp Estijos ir Suomijos seismologų yra gana glaudus bendradarbiavimas ir Estijos seismologinių stočių duomenis naudoja Helsinkio universiteto Seismologijos instituto (HUSI) specialistai. Kiek žinoma Estijos geologijos tarnyba nesudarinėja atskiro seismologinio biuletenio. Gana išsamų seismologinį biuletenį visai Šiaurės Europai sudaro HUSI specialistai ir šis biuletenis gana gerai padengia ir visą Estijos teritoriją. HUSI tinklapyje¹⁰ yra pateikti Šiaurės Europos seismologiniai metiniai biuleteniai nuo 2001 iki 2011 m. Pagal jų duomenis 2003 m. sausio 12 d. ir 2006 m. rugpjūčio 16 užfiksuoti du žemės drebėjimai Suomijos įlankoje greta Estijos krantų, kurių magnitudės buvo $M_L = 1,2$ ir $M_L = 2,1$. Dar vienas drebėjimas, kurio magnitudė buvo $M_L = 1,6$, užfiksuotas 2004 m. sausio 28 d. vakarinėje Estijos dalyje Kirbla miestelio apylinkėse.

Latvija

Pirma seisminė stotis Latvijoje buvo įrengta 1994 m. šiaurinėje šalies dalyje, Valmieros rajone, Skujas vienkiemyje (V. Nikulin, asmeninis pokalbis). Stotyje buvo įrengti Rusijoje pagaminti trumpo periodo seismometrai „CM-3KB“, o duomenų registravimui buvo naudojama analoginio tipo įranga

¹⁰ <http://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/eqs.html>, žiūrėta 2014.02.20.

„CCK“ – seisminiai duomenys buvo registruojami ant popierinių juostų. 2000 m. analoginis duomenų registratorius pakeistas analoginiu/skaitmeniniu „БФХ“ įrenginiu. Nuo 2003 m. duomenų įskaitmeninimui ir kaupimui pradėtas naudoti įmonės GeoSig (Šveicarija) pagaminta portatyvinė seiminė stotis GBF-316. „Skujas“ seismologinė stotis nustojo veikti 2014 m., kai Latvijos aplinkos, geologijos ir meteorologijos centro (LAGMC) vadovybė nusprendė, kad šios seismologinės stoties tolimesnis eksploatavimas ir/ar modernizavimas nėra ekonomiškai tikslingas.

Po 2004 m. Kaliningrado žemės drebėjimų Latvijos vyriausybė nusprendė Latvijoje įrengti naują ir modernią seismologinę stotį. Taip 2006 m. vakarinėje Latvijos dalyje, Kuržemėje, Dundagos savivaldybėje, Slitere vietovėje buvo įrengta ir pradėjo veikti plataus diapazono seismologinė stotis SLIT. Ši stotis buvo įjungta į tarptautinį tinklą GEOFON tinklą¹¹. Latviškų ir kitų gretimų valstybių seismologinių stočių duomenys buvo apdorojami ir analizuojami Latvijos geologijos tarnyboje. Vėliau, po 2005 m. įvykusio Latvijos geologijos tarnybos sujungimo su Latvijos meteorologijos tarnyba, ši veikla buvo perkelta į LAGMC. Latvijos seismologinės stoties SLIT duomenis realiu laiku galima gauti per GFZ serverius.

Kol Latvijos seismologiniai tyrimai buvo vykdomi Latvijos geologijos tarnyboje, t.y. iki 2005 m. kiekvienais metais buvo ruošiami seismologiniai biuletiniai. Po Latvijos geologijos tarnybos įjungimo į LAGMC seismologiniai biuletiniai nebebuvo rengiami. Per visą instrumentinių stebėjimų laiką, t.y. nuo 1994 m. Latvijos teritorijoje nebuvo registruotas nei vienas tektoninės prigimties seisminis įvykis. Tuo tarpu kiekvienais metais seismologinės stotys esančios Latvijos ir gretimų valstybių teritorijose užregistruoja po kelias dešimtis karjerų ar karinių sprogdinimų (V. Nikulin, asmeninis pokalbis).

¹¹ <http://geofon.gfz-potsdam.de>, žiūrėta 2014.03.05.

Lietuva

Pirmieji seismologiniai stebėjimai Lietuvoje pradėti 1970 m. Fizikos institute įkūrus seismologinių stebėjimų stotį (Ilginytė ir Šalavėjus, 1994). Iki 1992 m. registruoti duomenys buvo siunčiami į Obninsko (Rusija) seismologinių tyrimų centrą. Vilniaus stoties duomenys buvo panaudoti Žemės plutos bei viršutinės mantijos nevienalytiškumui bei platformų judesiams tirti (Ilginytė ir Šalavėjus, 1994). Nuo 1992 m. birželio seisminių duomenų apdorojimą perėmė Fizikos instituto darbuotojai. Buvo sudarytas 1991–1995 m. Vilniaus stotyje registruotų duomenų katalogas (Šalavėjus S. ir P. Suveizdis, nepublikuota ataskaita, LGT fondas; Nr. 4394). Kataloge pateikti tik P ir S bangų atėjimo laikai. Kadangi naudoti tik vienos seisminės stoties duomenys, buvo galima nustatyti tik apytikslį atstumą iki įvykio epicentro. Lokalizuoti seisminių įvykių epicentrų, kurių seismines bangas registravo Fizikos instituto seismometrai galimybės nebuvo. Vilniaus seisminė stotis per visą savo veiklos laikotarpį vietinių seisminių įvykių neužfiksavo. Dėl susidėvėjusios įrangos ir finansavimo trūkumo stotis nustojo veikti 1998 m.

1986 m. viename iš Černobylio atominės elektrinės (Ukraina) reaktorių įvyko katastrofinio masto avarija. Po jos buvo peržiūrėti tarybinių atominių elektrinių saugumo klausimai. 1988 m. sudaryta speciali 22 ekspertų komisija, Ignalinos AE aikštelės ir jos apylinkių seismingumo klausimams išnagrinėti. Komisija padarė išvadą, kad projektuojant ir statant Ignalinos AE nebuvo tinkamai išnagrinėtas šios vietovės seisminis pavojingumas, nors tokia analizė privalėjo būti atlikta pagal šalies vidaus ir tarptautinius reikalavimus, ir rekomendavo aplink Ignalinos AE įsteigti 5 stočių seisminio monitoringo tinklą, bei vykdyti nuolatinius seisminius stebėjimus.

1992 m. išsivysčiusių industrinių valstybių grupė „G-7“ skyrė lėšų tarybinių branduolinių reaktorių saugumui didinti. Vienas Ignalinos AE saugumą didinančių projektų numatė Seisminio aliarmo sistemos (SAS) ir ją papildančios Seisminio monitoringo sistemos (SMS) įrengimą. 1999 m. Ignalinos AE buvo įrengta SAS ir SMS su keturiomis seisminėmis stotimis,

išdėstytomis aplink elektrinę, bei duomenų surinkimo ir registravimo centru pačioje AE (Pačėsa, 2001; Pačėsa, 2011). Dar dvi seisminės stotys Latvijos bei Baltarusijos teritorijose, nesutarus su kaimyninių valstybių vyriausybėmis, taip ir nebuvo įrengtos. SAS buvo skirta pavojaus signalui generuoti, jei pavojingai galinga seisminė banga artėtų prie Ignalinos AE. SMS skirta vietinių seisminių įvykių monitoringui, buvo sudaryta iš keturių seisminių stočių, nutolusių nuo AE maždaug per 30 km. Jos įrengtos tose pačiose vietose kaip ir SAS stotys. Kiekvienoje išorinėje stotyje 30 m gylio gręžiniuose buvo įrengti vertikalūs trumpo periodo seismometrai. Pačiose seisminėse stotyse sumontuoti analoginiai skaitmeniniai keitikliai ir radijo įranga seismologiniams duomenims nuolatos perduoti į duomenų registracijos centrą Ignalinos AE, kur jie buvo surenkami ir saugomi (Pačėsa, 2001; Pačėsa, 2011).

1999 m. Lietuvos geologijos tarnyboje (LGT) pradėtas Lietuvos seismologinio monitoringo projektas, kurio pagrindinis tikslas buvo kaupti, apdoroti, analizuoti ir archyvuoti Ignalinos AE SMS duomenis. Tarp LGT ir Ignalinos AE buvo sudaryta sutartis dėl seisminių duomenų ir jų apdorojimo rezultatų keitimosi. Tokiu būdu AE darbuotojai aptarnavo ir vykdė SAS ir SMS priežiūrą bei palaikymą, o SMS duomenis apdorojo LGT specialistai.

Per daugiau nei dešimtmetį Ignalinos AE SMS stotyse vykdytą seismologinį monitoringą užfiksuoti keli vietiniai tektoninės prigimties seisminiai įvykiai (Pačėsa, 2011; Pačėsa ir Janutytė, 2011): 2001-09-04 – nelokaluotas vietinis žemės drebėjimas $M_L = \sim 2,1$, 2002-12-18 – žemės drebėjimas Baltijos jūroje, piečiau Gotlando salos $M_L = 3,6$, 2004-09-21 – du Kaliningrado žemės drebėjimai $M_W = 5,0$ ir $M_W = 5,2$. Didžioji dalis SMS registruotų seisminių įvykių sietini su Lietuvos ar kaimyninėse šalyse karjeruose vykdytais sprogdinimais arba senų sprogdinimų naikinimo operacijomis Baltijos jūroje.

2006–2008 m. Rytų Europoje, tame tarpe ir Lietuvoje buvo vykdomas pasyviosios seismikos eksperimentas PASSEQ (Janutytė et al., 2012). Eksperimento pagrindinis tikslas buvo tirti Žemės mantijos nevienalytiškumus Rytų Europoje. Šio eksperimento metu Lietuvos teritorijoje buvo įrengtos 26

plataus diapazono laikinos seismologinės stotys ir tai sudarė unikalias galimybes stebėti vietinius seisminius procesus. Išanalizavus PASSEQ seismologinius duomenis buvo identifikuoti 45 vietiniai seisminiai įvykiai. Didžioji jų dalis buvo sprogdinimai vykdyti žinomuose karjeruose ar jūrinėse išminavimo operacijose (pvz. Open Spirit 2007). Tačiau vieno įvykio lokalizuoto Baltijos jūroje greta Kaliningrado srities kranto 2007 m. birželio 14 d. ir kito įvykio lokalizuoto centrinėje Lietuvos dalyje 2007 m. liepos 4 d. seismogramų formos buvo panašios į tektoninių žemės drebėjimų seismogramas (Janutytė et al., 2012).

2012 metais LGT buvo baigtas vykdyti „Geologinės aplinkos monitoringo pajėgumų stiprinimo“ projektas, ^ finansuotas ES Regioninės plėtros fondo lėšomis. LGT buvo įkurtas Seismologinių duomenų centras ir galutinai įrengtos bei pradėjo veikti dvi plataus diapazono seisminių stebėjimų stotys Paburgėje (PBUR), Plungės raj., ir Paberžėje (PABE), Kėdainių raj. Šios dvi seisminių stebėjimų stotys buvo įjungtos į tarptautinės GEOFON programos seismologinį tinklą, kurio veiklą koordinuoja GFZ (Lazauskienė et al., 2012; Pačėsa ir kt., 2013). LGT seismologinis centras gavo ne tik naujų duomenų iš Lietuvoje naujai įrengtų seismologinių stočių PBUR ir PABE, bet ir iš kitų GEOFON tinklo stočių – SLIT (Latvija), VSU ir MTSU (Estija), SUW ir GKP (Lenkija), BSD (Danija), UPP (Švedija), ALL (Alandų salos, Baltijos jūra). Tokiu būdu LGT Seismologinis centras gauna duomenis iš virtualaus Baltijos jūros regiono seismologinio tinklo ir tai įgalina registruoti daugiau silpnesnių įvykių ir ženkliai pagerinti registruojamų įvykių lokalizacijas. Lietuvos plataus diapazono seismologinių stočių duomenys yra laisvai prieinami per GFZ serverius.

Kaliningrado sritis

Karaliaučiaus universiteto, veikusio nuo 1544 iki 1945 m., docentas F. Errulat taip aprašė pirmos seismologinės stoties įkūrimą¹². 1905 m. geologijos

¹² <https://sites.google.com/site/seismkantiana/home/seismicnost-baltiki>, žiūrėta 2014.04.15.

profesorius A. Tornquist iškelė mintį apie seismologinės stoties Karaliaučiuje įsteigimą. Tačiau Prūsijos valdžia tik 1910 m. skyrė tam reikalingų lėšų. Stoties vieta buvo parinkta Fritcen miške, greta girininko namo, maždaug už 800 m. į vakarus nuo geležinkelio stoties Gross Raum (dabar Rebinovka). Joje buvo įrengtas Vicherto tipo seismografas. Seismologinė stotis oficialiai buvo atidaryta 1912 m., tačiau seismologinius stebėjimus buvo pristabdęs Pirmasis pasaulinis karas ir tik 1921 m. stotis pradėjo nuolatinus stebėjimus. Nuo tada ši stotis buvo įtraukta į tarptautinių seismologinių stočių sistemą ir pradėjo rengti seismologinius biuletenius. 1930 m. Karaliaučiaus seismologinė stotis buvo pervadinta į „Alberto universiteto geofizikinę observatoriją“ ir ji veikė iki Antrojo pasaulinio karo pabaigos 1945 m. Žinių apie tai, kad Karaliaučiaus seisminė stotis būtų užregistravusi vietinių seisminių įvykių nėra. Šį faktą patvirtina ir Jungtinis centrinės, šiaurinės ir šiaurės-vakarų Europos žemės drebėjimų katalogas (Grünthal et al., 2009), kuriame Karaliaučiaus stoties veikimo metu jokių įvykių Karaliaučiaus krašte, šiaurinėje Lenkijoje ar jų apylinkėse nėra.

Po Antro pasaulinio karo Karaliaučiaus kraštą perėmus Rusijai, ši teritorija laikyta visiškai aseismiška ir jokie tokio pobūdžio stebėjimai nebuvo vykdomi¹³. Tik po 2004 m. Kaliningrado žemės drebėjimų 2005 m. gruodžio 15 d. Rusijos geofizikos tarnyba netoli Kaliningrado miesto įrengė plataus diapazono seismologinę stotį (tarptautinis kodas – KLN).

Lenkų tyrėjai 1996–1997 m. analizavo seisminius įvykius užregistruotus Fenoskandiškose seisminėse grupėse: ARC, FIN, HFS, NOA ir lokalizuotus Gdansko įlankoje. Taip pat buvo naudoti trijų laikinų seismologinių stočių: SUW, CZA ir OLDS duomenys (Wiejacz P. and W. Debski, 2001). 27 įvykiai buvo naujai lokalizuoti ir jų epicentrai pasislinko į šiaurę į Rusijos teritorinius vandenis. Remiantis įvykių seismogramų formomis ir jų pasiskirstymu laike tyrėjai padarė išvadą, kad tai tikriausiai žmogaus veiklos sukelti įvykiai – sprogdinimai.

¹³ <https://sites.google.com/site/seismkantiana/home/sejsmicnost-baltiki>, žiūrėta 2014.04.15.

2006–2008 m. Rytų Europoje buvo vykdomas pasyviosios seismikos eksperimentas PASSEQ (Janutyte et al., 2012). Nors laikinos seismologinės stotys nebuvo įrengtos Kaliningrado srityje, tačiau stotys įrengtos Lietuvos ir Lenkijos teritorijose suteikė galimybę stebėti seisminius reiškinius ir Kaliningrado srityje. Vietinio seismingumo tyrėjų grupė Kaliningrado srityje identifikavo penkis vietinius įvykius, kurie buvo lokalizuoti Baltijos jūros priekrantėje. Keturi iš jų buvo įtraukti į HUSI arba NORSAR biuletenius, o vienas silpnas įvykis buvo atrastas naujai. Įvykių spektrogramų analizė atskleidė, kad trys įvykiai (2006 m. rugsėjo 12 d., 2007 kovo 20 d. ir 2007 m. gegužės 28 d.) negali būti laikomi įprastais sprogdinimais ar žemės drebėjimais. Autorių nuomone šie įvykiai labiausiai panašūs į seisminius „tremorus“ – tik 2002 m. Japonijoje atrastais seismologiniais reiškiniais, kai lėtai slenkančios ir besitrinančios uolienos subdukcijos zonose generuoja silpnus ilgai trunkančius seisminius signalus neturinčius aiškiai išreikštų atskirų seisminių bangų tipų atėjimų¹⁴. 2007 m. gegužės 2d. (07:08 UTC) įvykis neabejotinai buvo identifikuotas kaip povandeninis sprogdinimas, o 2007 m. liepos 14 d. (00:40 UTC) įvykio spektrogramų analizė atskleidė, jog tai galėjo būti tektoninės prigimties žemės drebėjimas.

Nuo 2007 m. balandžio iki spalio mėn. Širšovo okeanografijos instituto (Rusija) specialistai jūroje ir vakarinėje Sambijos pusiasalio dalyje (Kaliningrado sritis) buvo įrengę keturias laikinas seismologines stotis (Kovachev, 2008). Kaip teigė šio tyrimo autorius, jam pavyko užregistruoti du vietinius įvykius šiaurinėje ir pietinėje Kaliningrado srities dalyje (2007 m. liepos 4 ir 5 d.), kurių magnitudės buvo $M_L = 3,4$ ir $M_L = 3,7$. Tačiau šiuos užregistruotus įvykius reikėtų vertinti gana kritiškai, nes straipsnyje pateiktų seismogramų formos nėra panašios į tikrų tektoninių žemės drebėjimų seismogramas. Be to, tokio stiprumo seisminiai įvykiai neabejotinai turėjo būti registruojami Skandinavijos seisminių grupių (Pačėsa A., 2000, nepublikuota ataskaita, LGT fondai, Nr. 5329), tačiau nei pilnai automatiniame NORSAR GBF, nei HUSI biuleteniuose šių įvykių nėra. Jų neužfiksavo nei tuo metu

¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Episodic_tremor_and_slip, žiūrėta 2014.04.17.

veikusios PASSEQ eksperimento stotys. Kita vertus Kovachev (2008) publikacijoje pateiktos seismogramos gali būti siejamos su jau minėtais seisminiais tremorais – silpnais ir ilgai trunkančiais seisminiais signalais neturinčiais aiškiai išreikštų atskirų seisminių bangų tipų atėjimų.

2007–2008 m. Kaliningrado mieste ir jo apylinkėse O. J. Šmidto vardo Žemės fizikos instituto (Rusija) specialistai įrengė 11 laikinų seismologinių stočių. Per šį laikotarpį buvo užregistruoti 44 vietiniai seisminiai įvykiai ir 32 įvykiai buvo interpretuoti kaip galimai tektoninės prigimties¹⁵. Tačiau šią informaciją apie galimus 32 žemės drebėjimus reikia interpretuoti gana kritiškai. Nepavyko rasti jokie atskiro straipsnio ar ataskaitos detaliau aprašančio šiuos stebėjimus. Be to, vėlesnės Rusijos tyrėjų publikacijos (pvz.: Уломов и др., 2008; Гарецкий и Несмеянов, 2009; Аносов и др., 2010), kurios gana „liberaliai“ naudodavo nuo sprogdinimo įvykių neišvalytus NORSAR ir HUSI katalogus, irgi neminėjo 2007–2008 m. O. J. Šmidto vardo Žemės fizikos instituto stebėjimų Kaliningrado srityje ir jų rezultatų.

2008–2012 m. Lenkijoje buvo vykdomas „Lenkijos teritorijos seisminio pavojingumo monitoringo“ projektas (Trojanski et al., 2015). Antrame šio projekto etape nuo 2010–2012 m. laikinos seismologinės stotys buvo įrengtos visoje Lenkijos teritorijoje, koncentruojantis ties vietomis, kuriose buvo įvykę istoriniai žemės drebėjimai. Šio tyrimo autoriai mini, kad, be tektoninės prigimties seisminių įvykių, buvo identifikuota ir daug žmogaus veiklos sukeltų seisminių įvykių. Kaip pavyzdį jie pateikia seisminį įvykį lokalizuotą pietinėje Kaliningrado srities dalyje. Laikinos seismologinės stotys užregistravo reguliariai kas 2 min. pasikartojančius impulsus. Jungtinio epicentro radimas ir greičio inversija parodė, kad seisminių signalų sklaidimo greitis buvo ~350 m/s kas atitiko garso sklaidimo greičiui. Šiuos signalus galėjo sukelti viršgarsiniai lėktuvai, tačiau visų signalų lokalizacijos buvo vienoje vietoje ir tai paneigia tokią prielaidą. Kita vertus, Kaliningrado sritis yra stipriai militarizuota teritorija. Joje yra įrengtas ne vienas karinis poligonas, o dalyje iš jų atliekami senų sprogdinimų naikinimo darbai (Anosov G, asmeninis

pokalbis). Todėl bent jau dalį neaiškios prigimties seisminių įvykių ar net minėtų „tremorų“ Kaliningrado srityje galima sieti kariškių vykdoma veikla.

Baltarusija

Instrumentiniai seismologiniai stebėjimai Baltarusijoje pradėti 1963 m., kai buvo įrengta ir pradėjo veikti seismologinė stotis Plešenicų vietovėje (tarptautinis kodas – MIK), nutolusioje 55 km į šiaurę nuo Minsko miesto (Гарецкий и Несмеянов, 2009). Vėliau buvo įrengtos kitos seismologinės stotys: „Naroč“ (1979 m., tarptautinis kodas – NAR), „Gomel“ (1982 m., GML), „Soligorsk“ (1983 m., SOL), „Brest“ (1991 m., BRT), „Gluškevičy“ (2002 m., GLSH), „Polock“ (2006 m., PLTS), „Mogiliov“ (2007 m., MGL) ir „Litviany“ (2008 m., LTV). Dėl nepatenkinamų geologinių-geofizikinių sąlygų seisminės stotys „Brest“, „Gomel“ ir „Gluškevičy“ buvo uždarytos.

Baltarusijos seisminių stočių darbą palaikė ir jose registruotus duomenis apdorodavo 1980 m. Baltarusijos Geochemijos, geologijos ir geofizikos institute įkurta Eksperimentinė-metodinė seismologinė partija. 2001 m. ši institucija buvo reorganizuota į Geofizikinio monitoringo centrą. Tarp LGT ir Geofizikinio monitoringo centro yra pasirašyta tarpusavio bendradarbiavimo sutartis, tačiau LGT realiai gauti seismologinius duomenis iš Baltarusijos seismologinių stočių yra gana sudėtinga.

Instrumentinių seismologinių stebėjimų eroje Baltarusijos teritorijoje užfiksuoti penki stipresni (pasireiškę makroseismiškai) žemės drebėjimai (Гарецкий и Несмеянов, 2009). Visų jų epicentrai buvo lokalizuoti Soligorsko miesto apylinkėse, kur vykdoma intensyvi kalio druskų kasyba. Todėl šie seisminiai įvykiai priskirtini prie indukuotų žemės drebėjimų. Be šių stipresnių seisminių įvykių, Soligorsko apylinkėse kiekvienais metais instrumentiškai užregistruojama po 30–40 silpnų ($M = \sim 0-2,0$) indukuotų žemės drebėjimų (Aronov G., asmeninis pokalbis).

¹⁵ <https://sites.google.com/site/seismkantiana/home/seismicnost-baltiki>, žiūrėta 2014.04.15.

Lenkija (šiaurinė dalis)

Pirmoji seismologinė stotis (RAC) pietinėje Lenkijoje, vietovėje Raciborz buvo įrengta 1928 m. 1966 m. įrengta stotis NIE irgi pietinėje Lenkijos dalyje vietovėje Niedzica. Nuo 1995 iki 2004 m buvo atliktas paskutinis Lenkijos seismologinio monitoringo tinklo plėtimo ir modernizavimo etapas ir 2014 m. Lenkijoje buvo septynios seisminės stotys skirtos visos šalies monitoringui¹⁶: SUW (vietovė – Suwalki), KWP (Kalvaria Paclawska), BEL (Belsk), GKP (Gorka Klasztorna), KSP (Ksiaz), NIE (Niedzica) ir OJC (Ojcow). Lenkijos seismologinių stočių tinko darbą prižiūri, kaupia ir analizuoja seismologinius duomenis Lenkijos mokslų akademijos Geofizikos institutas. Daugelio Lenkijos seismologinių stočių duomenys yra laisvai prieinami per GFZ arba programos „Orfeus“¹⁷ serverius. Rytų Baltijos regionui svarbiausia yra šiaurės-rytinėje dalyje įrengta seismologinė stotis SUW (netoli Suvalkų miesto).

Lenkijoje, iš kelių dešimčių instrumentiškai užregistruotų žemės drebėjimų, didžioji jų dalis yra susikoncentravę pietinėje šalies dalyje palei Sudetų ir Karpatų kalnus ir išilgai TTZ, praeinančios per visą Lenkiją nuo jos pietrytinės iki šiaurės-vakarų dalies. Arčiau rytų Baltijos regiono, t.y. šiaurės-rytų Lenkijos dalyje instrumentiškai yra užfiksuotas tik vienas žemės drebėjimas ($M = 4,0$) įvykęs 1994 m. liepos 1 d. netoli Augustavo miesto (Guterch B., 2009).

Taip pat galima vėl paminėti 2008–2012 m. Lenkijos teritorijoje vykdytą „Lenkijos teritorijos seisminio pavojingumo monitoringo“ projektą (Trojanski et al., 2015). Šio tyrimo autoriai mini, kad, šiaurės-rytų Lenkijos dalyje buvo užregistruota nemažai seisminių įvykių, tačiau labai mažai tikėtina, kad bent dalis iš jų buvo tektoninės prigimties.

¹⁶ <http://www.igf.edu.pl/badania-1.php>, žiūrėta 2014.04.30.

¹⁷ <http://www.orfeus-eu.org/data.html>, žiūrėta 2014.04.26.

Skandinavijos šalys

Skandinavijos šalys ir Suomija globalaus seismingumo kontekste yra laikomos mažai seismiškai aktyviomis teritorijomis (Wahlstrom, and Grunthal. 2001), tačiau jis visgi yra ženkliai didesnis nei Rytų Baltijos regione (1.1.1 pav.).

Seismologiniai tyrimai Fenoskandijoje yra gerai išvystyti. Norvegijoje yra įrengtos 25 seisminės stotys. Taip pat yra trys seisminės grupės NORESS, ARCESS ir SVAESS¹⁸. Seisminės grupės tai – keli ar keliolika seisminių imtuvų įrengtų nedideliame plote (paprastai ~1–4 km²), kurie veikia kaip vieninga sistema arba, galima sakyti, kad veikia kaip kryptinė antena galinti registruoti gana silpnus ir pakankamai tolimus seisminius įvykius. Norvegijoje yra du pagrindiniai seismologiniai centrai: Bergeno universiteto Žemės mokslų departamento seismologijos observatorija, kuri prižiūri ir apdoroja Norvegijos nacionalinio seismologinio tinklo duomenis¹⁹ ir NORSAR seisminių tyrimų centras, kuris kaupia ir apdoroja visos Fenoskandijos seisminių grupių duomenis²⁰.

Švedijoje yra apie 60 plataus diapazono seisminių stočių²¹ ir viena seisminė grupė HFS. Švedijoje seismines stotis prižiūri ir seisminius duomenis apdoroja Upsalos universiteto Žemės mokslų departamentas.

Suomijoje yra 19 seisminių stočių²², kurias prižiūri ir jų duomenis apdoroja Helsinkio universiteto geomokslų ir geografijos departamentas ir 4 seismines stotis prižiūri ir jų duomenis apdoroja Oulu universiteto Sodankyla observatorija²³. Suomijoje taip pat yra viena seisminė grupė FINES²⁴.

¹⁸ <http://www.norsardata.no/NDC/stations/>, žiūrėta 2015.06.12.

¹⁹ <http://nnsn.geo.uib.no/>, žiūrėta 2015.06.12.

²⁰ <http://www.norsardata.no/NDC/stations/>, žiūrėta 2015.06.12.

²¹ <http://snsn.geofys.uu.se/>, žiūrėta 2015.06.12.

²² <http://www.helsinki.fi/geo/seismo/english/observation/stations.html>, žiūrėta 2015.06.12.

²³ <http://www oulu.fi/sgo-oty/english/>, žiūrėta 2015.06.12.

²⁴ <http://www.helsinki.fi/geo/seismo/english/observation/stations.html>, žiūrėta 2015.06.12.

1.4. SEISMINIO PAVOJINGUMO TYRIMAI BALTIJOS REGIONE

Teritorijos seisminio pavojingumui įvertinti praktikoje naudojami du pagrindiniai metodai – deterministinis ir tikimybinis. Tikimybinis seisminio pavojingumo vertinimo (TSPV) metodas apjungia SZ, skirtingų drebėjimų pasikartojamumą, skirtingų seisminių virpesių slopimo priklausomybių, įvairių neapibrėžtumų susijusių tiek su patikimos informacijos trūkumu, tiek ir su atsitiktiniu drebėjimų vyksmu nagrinėjimą ir agregavimą. Skirtingai nuo tikimybinio, deterministinis seisminio pavojingumo vertinimo (DSPV) metodas nevertina įvairių neapibrėžtumų; čia yra skaičiuojamas tik maksimalus tam tikrai vietai nuo didžiausią įtaką turinčių SZ poveikis. Skaičiavimai atliekami naudojant seisminių bangų sklidimo teoriją, įskaitant seisminių bangų slopinimą tolystant nuo SZ bei vietinių gruntų įtaką, kurie modeliuojami kaip horizontaliai sluoksniuota erdvė. Seisminių bangų frontai yra modeliuojami kaip plokščios bangos nuo SZ sklindančios vertikalčiai aukštyn ir veikiančios Žemės paviršiaus gruntą. Gamtiniuose procesuose visada egzistuoja neapibrėžtumai. Todėl DSPV metodas, neatsižvelgiantis į tokius neapibrėžtumus, daugeliu atveju nėra visiškai korektiškas.

Vienas pirmųjų seisminio pavojingumų vertimų remiantis DSPV metodu ir apimantis teritorijas esančias šalia Rytų Baltijos regiono buvo atliktas 1937 m. TSRS (Tarybų Socialistinių Respublikų Sąjungoje). Vėliau tarybiniai tyrėjai seisminio pavojingumo žemėlapius panaudodami tą patį deterministinį metodą atnaujindavo maždaug kas 10 metų ir naujos redakcijos buvo paskelbtos 1949, 1957, 1968 ir 1978 m²⁵. Rusijos arba TSRS seisminio pavojingumo žemėlapiai nuo 1949 m. apėmė ir Rytų Baltijos regioną. Pavyzdžiui 1978 m. Tarybų Sąjungos deterministiniame seisminio pavojingumo žemėlapyje viso Rytų Baltijos regiono pavojingumas vertintas V balų (MSK-64 skalės) intensyvumu.

Pasaulinėje praktikoje jau prieš keltą dešimtmečių buvo prieita bendros nuomonės, kad intensyvumo balus tiesiogiai sieti su grunto pagreičiais yra nekorektiška, nes tie patys žmogaus jutimais ar matomais sugriovimais

aprašomi intensyvumo balai gali būti sąlygoti tiek skirtingų grunto virpesių pagreičių, tiek skirtingų virpesių dažnių esant tam pačiam pagreičiui. Tačiau pagal visuotinai Rusijos tyrėjų priimtas priklausomybes V intensyvumo balai atitinka $15\text{--}30\text{ cm/s}^2$ horizontalių grunto dalelių virpesių pagreitį arba PGA (angliškai Peak Ground Acceleration). Vienas iš paskutinių Rusijos Federacijos teritorijos seisminio pavojingumo vertimas buvo paskelbtas 1997 m. Šios redakcijos seisminio pavojingumo žemėlapių komplektas buvo sudarytas panaudojant TSPV metodą, tačiau Rusijos tyrėjai grunto virpesių charakterizavimui ir toliau naudojo makroseisminės MSK-64 skalės balus, kai tuo metu pasaulinėje praktikoje jau senokai buvo naudojamas maksimalus horizontalių grunto dalelių virpesių pagreitis (PGA). Komplektą sudarė trys pagrindiniai žemėlapiai (OCP-97-A, OCP-97-B, OCP-97-C) parodantys skirtingų teritorijų seisminio pavojingumo lygį makroseisminės MSK-64 skalės balais, kurie gali būti viršyti per 50 metų su 10% tikimybe (OCP-97-A), su 5% tikimybe (OCP-97-B) ir su 1% tikimybe (OCP-97-C). Alternatyviai 10%, 5% ir 1% viršijimo per 50 metų tikimybės gali būti suprantamos kaip apibrėžto intensyvumo virpesių pasikartojamumas kas 475, 1000 ir 5000 metų (Уломов и Шумилина, 1999). Žemėlapiai buvo sudaryti II kategorijos gruntams, mastelis – 1:8000000. Šie Rusijos Federacijos bendrojo seisminio rajonavimo žemėlapiai neparodė Rytinės Baltijos teritorijos seisminio pavojingumo, tačiau nurodė Rusijos regionų besiribojančių su rytine Estijos ir Latvijos dalimis, bei su pietvakarine Lietuvos dalimi. 475 metų pasikartojamumo žemėlapyje (OCP-97-A) Rusijos Federacijos sričių besiribojančių su Rytinės Baltijos regionu seisminis pavojingumas vertintas V seisminio intensyvumo balais, kas atitinka nuo 15 iki 30 cm/s^2 PGA.

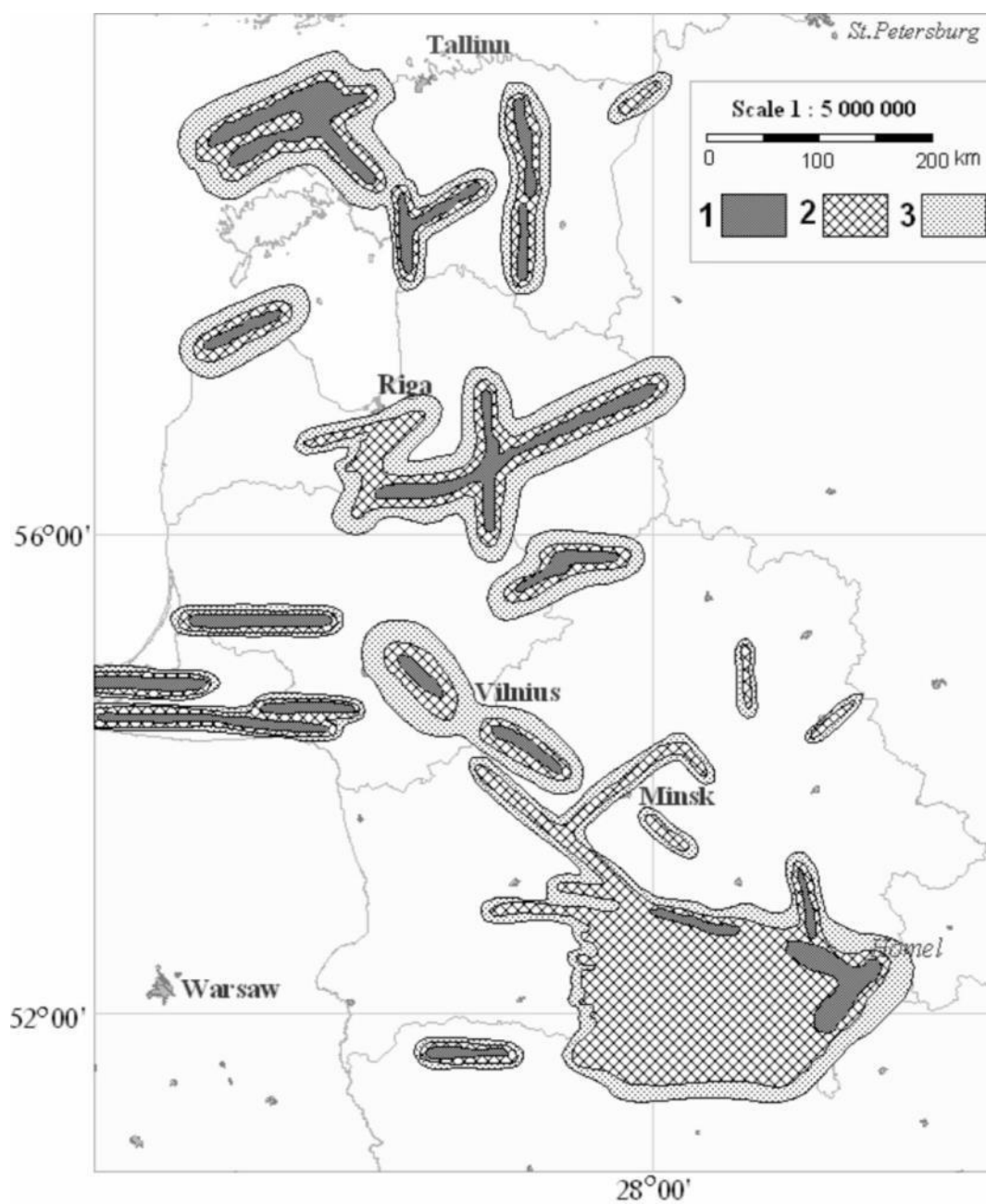
Baltarusijos tyrėjai 1990–1995-aisiais metais kompleksiskai išanalizavo seisminius, geologinius, tektoninius, neotektoninius ir geofizinius Baltijos respublikų, Baltarusijos ir Kaliningrado srities teritorijų duomenis ir sudarė Rytinės Baltijos ir Baltarusijos teritorijų seismotektoninį ir DSPV žemėlapius

²⁵ <http://seismos-u.ifz.ru/electr-earth.htm>, žiūrėta 2014.05.23.

(1.4.1. pav.; Aizberg et al., 1997). Buvo išskirta aštuoniolika SZ, susietų su žinomais lūžiais, įvertintos jų maksimalios drebėjimų magnitudės ir minimalūs hipocentų gyiliai (Гарецкий и др., 1997; Aizberg et al., 1997; Гарецкий и Несмеянов, 2009). Tam tikrų abejonių kelia zonų pločio skaičiavimas. Autoriai paaiškina, kad SZ plotis buvo prilygintas dvigubam minimaliam drebėjimo hipocentro gyliui konkrečioje zonoje, tačiau neatsižvelgta į teorines ar eksperimentiškai gautas grunto virpesių slopimo priklausomybes. Pagal šį žemėlapi daugelio SZ centrinėse srityse galimi VII balų (MSK-64 skalė) t.y. $61\text{--}120\text{ cm/s}^2$ PGA, periferijoje galimi VI ($31\text{--}60\text{ cm/s}^2$) ar V ($15\text{--}30\text{ cm/s}^2$) balų virpesiai. Ne lūžių zonose prognozuojamas mažesnis nei V balų intensyvumas ($< 15\text{ cm/s}^2$).

1992–1999 m. buvo vykdoma Pasaulinė seisminio pavojaus vertinimo programa (angl. GSHAP - *The Global Seismic Hazard Assessment Program*; Giardini et al., 1999). Pavojingumo vertimui buvo pasirinktas TSPV metodas. Galutinis seisminio pavojaus vertinimo rezultatas buvo Europos PGA, kuris su 10% tikimybe gali būti viršyti per 50 metų (475 m. pasikartojamumas), žemėlapio sudarymas. Pagal šį žemėlapi didžiajai daliai Rytų Baltijos regiono buvo priskirtos PGA vertės nuo 0 iki 20 cm/s^2 , atskiruose rajonuose (centrinėje ir šiaurės vakarų Latvijoje bei pietvakarių Estijoje) – nuo 20 iki 30 cm/s^2 .

1998 m. Ilginytė sudarė Lietuvos seisminio pavojingumo žemėlapi (Ilginytė, 1998), kuris rėmėsi DSPV metodika. Čia taip pat buvo išskirtos SZ, pateiktos jų charakteristikos (1.4.2 pav.). Ilginytės seismotektoninės situacijos vertinimu Lietuvos teritorijoje galimi žemės drebėjimų sukeltų virpesių intensyvumai gali kisti nuo I = V didžiojoje šalies dalyje iki I = VII rytuose. Padidintas seismingumas prognozuotas taip pat šiaurinėje ir vakarinėje šalies dalyse. Išskirtos SZ sutampančios su Vilniaus, Mažeikių, Telšių lūžiais. SZ trasuojama išilgai Baltijos jūros pakrantės. Pagrindinis šio seismotektoninio žemėlapio trūkumas yra nepakankamas seisminių įvykių filtravimas – į katalogą buvo įtraukti įvykiai, kurių gamtinė prigimtis yra labai abejotina (galimi sprogdinimai). Todėl šis seismotektoninis žemėlapis reikalauja revizijos.



1.4.1 pav. Rytų Baltijos ir Baltarusijos teritorijų deterministinis seisminio ravojingumo žemėlapis²⁶ (rus. k. Карта общего сейсмического районирования Беларуси и стран Балтии) pagal Aizberg et al., 1997. Galimų virpesių intensyvumai (MSK-64 skalė): 1 – VII, 2 – VI, 3 – V.

²⁶ <http://www.seismo.lv>, žiūrėta 2014.05.24.

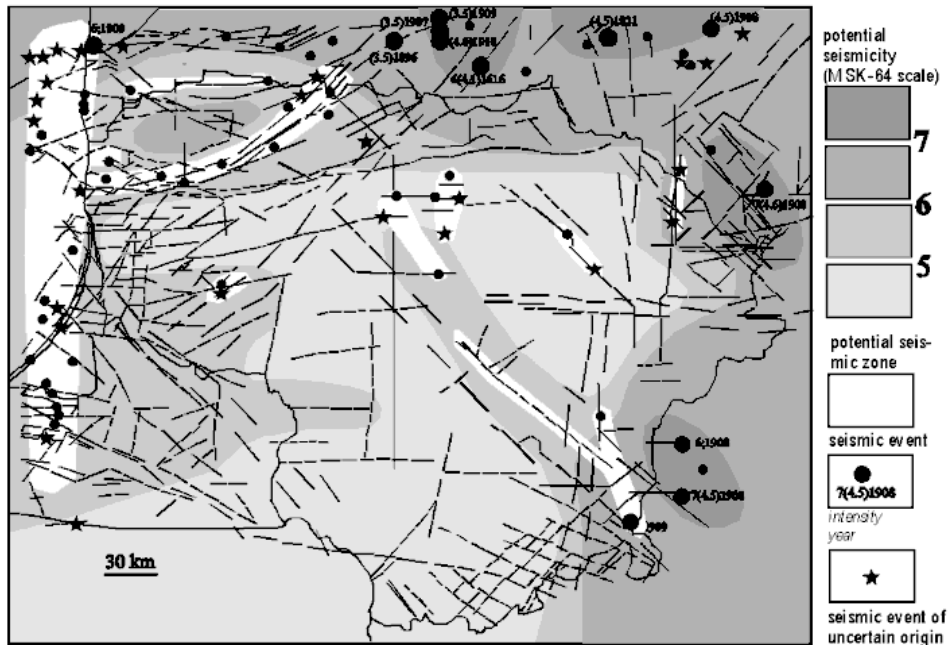
Jau minėtos GSHAP programos rėmuose remiantis TSPV metodu buvo vertintas centrinės Europos (Lenkijos, Čekijos ir Slovakijos) seisminis pavojingumas (Shenk et al., 2000). Vertinimas atliktas siekiant nustatyti PGA, kuris per 50 m. gali būti viršytas su 10% tikimybe (475 m. pasikartojamumas). Pagal šį seisminio pavojingumo vertinimą šiaurės-rytinėje Lenkijos dalyje, besiribojančioje su Lietuva ir Kaliningrado sritimi, egzistuoja šiek tiek didesnio seisminio pavojingumo zona, kur PGA gali siekti 30–40 cm/s².

2003 m. buvo baigtas Europos-Viduržemio jūros ESC-SESAME seisminio pavojaus vertinimo projektas (Jiménez et al., 2003). ESC-SESAME seisminio pavojingumo žemėlapyje, kuriame buvo pavaizduotos PGA vertės, kurios per 50 m. laikotarpį gali būti viršytos su 10% tikimybe (457 m. pasikartojamumas) buvo atvaizduota visa Europa. Rytų Baltijos regione seisminis pavojingumas PGA prasme buvo įvertintas nuo 0 iki 20 cm/s², o interpretuojant tokį vertinimą galima priimti, kad vidutinis Rytų Baltijos seisminis pavojingumas gali būti prilygintas ~10 cm/s².

2011 m. Šliaupa sudarė Lietuvos seisminio pavojingumo žemėlapi remdamasis DSPV metodika (neskelbta ataskaita, LGT fondai Nr. 20153). Išskirta 11 seismiškai aktyvių ir potencialiai aktyvių zonų ir pateiktos jų charakteristikos.

Naudojant deterministinio modeliavimo metodiką (linijiniam ir nelinijiniam grunto atsakui) buvo įvertintas maksimalaus galimo žemės drebėjimo poveikis Vilniaus miestui (Šliaupa, 2013). Priklausomai nuo grunto tipo maksimalus grunto virpesių pagreitis įvertintas 105 ir 140 cm/s² (I₀ = VII). Didžiausias pavojus siejamas su žemės drebėjimo poveikiu 2–10 aukštų pastatams.

Remiantis inžineriniais SCPT (seisminio grunto zondo) metodika įvertintos pagrindinių Lietuvos rišlių (molingų) ir nerišlių (smėlingų) kvartero amžiaus gruntų seisminės charakteristikos (Gadeiky et al., 2012 ir Gadeiky et al., 2013).



1.4.2 pav. Lietuvos seismotektoninis žemėlapis (Ilginytė, 1998) (pastaba – neatskirti natūralūs ir nenatūralūs seisminiai įvykiai). Čia pilka spalva pažymėta skaičiumi „5“ žymi teritorijas kur galimi V balų (MSK-64 skalė) intensyvumo virpesiai, spalva „6“ – VI balų virpesius, spalva „7“ – VII balų virpesius, balta spalva žymi potencialiai aktyvias seismines zonas, juodi taškai – seisminiai įvykiai, žvaigždės – nenustatytos prigimties seisminius įvykius.

2011 m. Latvijos tyrėjas V. Nikulin nuodugniai ištyrė Latvijos teritorijos seisminį pavojingumą (Nukulin, 2011). Naudodamas TSPV metodiką autorius sudarė Latvijos teritorijos seisminio pavojingumo žemėlapią prekvartero paviršiui vaizduojantį PGA vertes, kurios su 10% tikimybe gali būti viršytos per 50 m. (1.4.4 pav.). Šiame žemėlapyje išsiskiria penki PGA maksimumai sutampantys su Sigulgdos, Rygos, Olainės, Aizkrauklės ir Cesio vietovėmis, kur PGA reikšmės vertintos nuo 10 iki 13 cm/s^2 . Tuo tarpu kvartero paviršiuje tai pačiai tikimybei maksimalios PGA vertės neviršija 40 cm/s^2 . Tyrėjo nuomone, didžiausiu seisminiu aktyvumu pasižymi Baltijos jūros priekrantė (daugiausia jūroje), kuri yra ryški ir neotektoninių judesių žemėlapiuose. Čia įvyko Ventspilio (1785 m.), Irbės (1857 m.), Rygos (1853, 1870, 1907, 1908, 1909 ir 1910 m.) žemės drebėjimai.

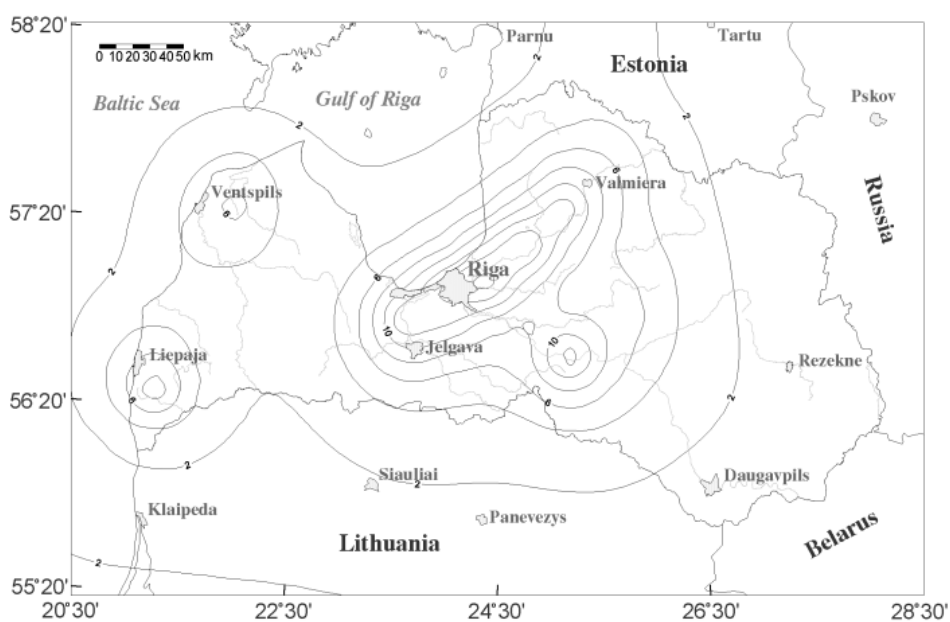
Vertinant regiono seisminį pavojingumą ypatingas dėmesys skirtas Ignalinos AE seisminės pavojingumo nustatymui. Elektrinė buvo suprojektuota ir pastatyta remiantis prielaida, kad šis regionas yra aseisminis, t.y. seisminis

pavojus yra minimalus. Tik 1988 m. buvo prieita išvados, jog elektrinę gali sudrebinti pakankamai stiprūs žemės drebėjimai. Nuo to laiko buvo atlikta visa eilė seisminio pavojaus ir rizikos vertinimų. Žemiau pateikiamas neskelbtų ataskaitų sąrašas, kuris gerai iliustruoja pastangas kuo tiksliau įvertinti kylančias tektonines grėsmes:

1. Report on tool investigation in order to perform seismic microzoning of Ignalina NPP site (in 2 volumes), PNIIS 1988., code ТАСПД-0045-54422
2. Analysis of initial seismological information of Ignalina NPP microzoning, VNIPIET, 89-01626, code ТАСПД-0045-55553;
3. Calculation of floor accelerograms and floor response spectrum, VNIPIET, 91-10335, code ТАСПД-0045-63714;
4. Determination of FA and FRS of blocks D and G Ignalina NPP (units 1 and 2) under seismic impact, VNIPIET, 91-10331, code ТАСПД-0045-59027;
5. Ignalina Nuclear Power Plant. Engineering investigation. Improvement of seismic stability of safety systems equipment. Walkdown in order of visual investigation of INPP units 1 and 2. Final report. Project ASP-7378; RAT-DIS-276/95;
6. Calculations “Refuelling machine RZM 488. Calculations of seismic stability”, 488И-00-0012PP, 488И-00-0012PP1, 488И-00-0012PP1, reg. № 46/SIP-2 dated 98 05 01;
7. Report “Conducting of investigations and development of recommendations on improving of seismic stability of INPP equipment”, KTU, Kaunas, code ТАСПД-0045-66803;
8. Report “Elasto-plastic analysis of DS horizontal support and its fixation on wall under seismic loading of INPP power unit 1”, KTU, Kaunas, code ТАСПД-1145- 68522;
9. Safety Improvement Report on INPP Unit 2, Task 1. Section 17.5. Seismic alarm and monitoring system, code ПТОа62-0345-1175B1;

10. Project Report "Seismic monitoring and alarm system", EWE-GeoSys, code TACПД –1845-67553;
11. P. Varpasuo. Report "Seismic hazard and ground motion for LAES site", (in the frame of IAEA programme "Safety of NPP with RBMK under external events impact), Fortum Engineering, 2000;
12. SAFETY ANALYSIS REPORT FOR INPP UNIT 2. Supersedes ПТОа62 -0345-430B1;
13. Assistance Programme to VATESI and its TSOs in Structural Dynamics Analysis. Phare project LI 01.18.02. 2004;
14. Išorinių faktorių įtaka Ignalinos AE saugumui (2005 m.) (LMSF)
15. Ignalinos AE reaktoriaus pastato 101/2 seisminės rizikos įvertinimas (2008-2009 m.) (LMSF).

2012 m. Lietuvos specialistų buvo įvertintas Visagino AE aikštelių seisminis pavojingumas. Remtasi tiek tikimybine, tiek deterministine metodologija (neskelbta ataskaita). Lygiagrečiai 2012 m. atliktas analogiškas Stabatiškės radioaktyvių atliekų aikštelės seisminio pavojaus modeliavimas (Šliaupa ir kt., 2012 – neskelbta ataskaita).



1.4.4 pav. Tikimybinis Latvijos teritorijos seisminio pavojingumo žemėlapis (Nukulin, 2011). Izolinijos atvaizduoja PGA, kurie gali būti viršyti per 50 metų su 10% tikimybe (475 m. pasikartojamumas).

1.5. APIBENDRINIMAS

Kaip jau minėta įvadiniame ir apžvalginuose skyriuose, Rytų Baltijos regionas pasižymi mažu seisminiu aktyvumu, tačiau nėra visiškai aseismišką. Čia įvyko virš 40 registruotų juntamų žemės drebėjimų, o teoriškai stipriausių žemės drebėjimų magnitudės gali siekti $M = 5,7$ ir tokio stiprumo drebėjimai jau gali turėti tam tikrą griaunamąjį potencialą. Taip pat reikia nepamiršti, kad šiame regione yra apie dešimtį potencialiai pavojingų pramonės objektų, kuriuos paveikus net ir vidutinio stiprumo žemės drebėjimui gali sutrikti normali jų veikla ar net įvykti avarijos.

Iki šiol atliktas ne vienas tyrimas siekiantis įvertinti atskirų Rytų Baltijos regiono dalių seisminį pavojingumą, tačiau nebuvo nei vieno tyrimo, kuris naudotų dabar visuotinai taikomą TSPV metodą ir aprėptų visą Rytų Baltijos regioną kaip vieningą seismotektoninę sistemą. Taip pat iki šiol nebuvo vertinta pačios seismiškai aktyviausios Europoje Vrančos (Rumunija) SZ poveikis Rytų Baltijos regionui. Todėl būtinas naujas Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo vertimas, paremtas TSPV metodologija.

2. TYRIMO METODIKA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI

2.1. TIKIMYBINIO SEISMINIO PAVOJINGUMO VERTINIMO METODIKA

Tikimybinis seisminio pavojingumo vertinimo metodas

Kaip minėta aukščiau, seisminio pavojingumo vertinimas remiasi dviem pagrindiniais metodais – DSPV (pvz.: McGuire, 2001; Bommer, 2002) ir TSPV (pvz.: Cornell, 1968; McGuire, 1976; Baker, 2008).

Metodiką, kuri dažniausiai naudojama atliekant tikimybinę seisminę analizę (angl. *Probabilistic Seismic Hazard Assessment* [PSHA]), pirmą kartą pasiūlė Cornell (1968). Nuosekliai aprašytą TSPV metodikos matematinį aparatą galima rasti tiek originaliuose Cornell (1968) ir McGuire (1976) straipsniuose, tiek ir nesenoje publikacijose (pvz. Baker, 2008; Kijko, 2011). Pagrindiniai keturi šio TSPV metodo analizės etapai, dar kitaip vadinami Cornell-McGuire procedūra (Kijko, 2011), pateikti 2.1.1 pav.

Pirmame etape yra identifikuojamos SZ. Kaip SZ gali būti tiek atskiri lūžiai, tiek ir plotinės seismogeninės provincijos („išbarstytas“ arba difuzinis seisminis aktyvumas). Antru atveju yra priimama, kad SZ seismogeninis potencialias yra vienodas visuose jo taškuose, t.y. bet kurioje SZ vietoje gali vykti žemės drebėjimai su vienoda ir tokia pat tikimybe.

Antrame etape yra apibrėžiamas kiekvienos SZ galimų drebėjimų pasiskirstymas pagal laiko intervalą ir magnitudės dydį. Šis pasiskirstymas nusako kokiomis proporcijomis pasiskirsto skirtingų magnitudžių drebėjimai per tam tikrą laiką arba, formuluojant kitaip, tam tikro dydžio drebėjimo atsiradimo tikimybę toje SZ per tam tikrą laiko tarpą, dažniausiai per vienerius metus. Klasikiniame TSPV metode yra priimama, kad žemės drebėjimai laike įvyksta atsitiktinai ir atitinka Poisson'o pasiskirstymą. Tai reiškia, kad drebėjimai statiškai laike įvyksta nepriklausomai vienas nuo kito ir tuo pačiu dažnumu. Toks statistinis nepriklausomumas reikškia, kad būsiami drebėjimai

nepriklauso nuo anksčiau buvusių drebėjimų. Dažniausiai drebėjimų magnitudžių pasikartojamui apibrėžti yra naudojamas Gutenberg-Richter sąryšis:

$$\text{Log}(N(M>M_0)) = a - b \cdot M \quad , \quad (2.1.1)$$

kur N yra įvykių skaičius, kurių magnitudė M didesnė nei M_0 – tam tikra pasirinkta slenkstinė magnitudė – dažniausiai magnitudė, nuo kurios seisminis katalogas yra laikomas pinu, a – įvykių skaičius įvykstančių per vienus metus, kurių magnitudė lygi arba didesnė negu M_0 , b – parametras nusakantis skirtingų magnitudžių pasiskirstymą.

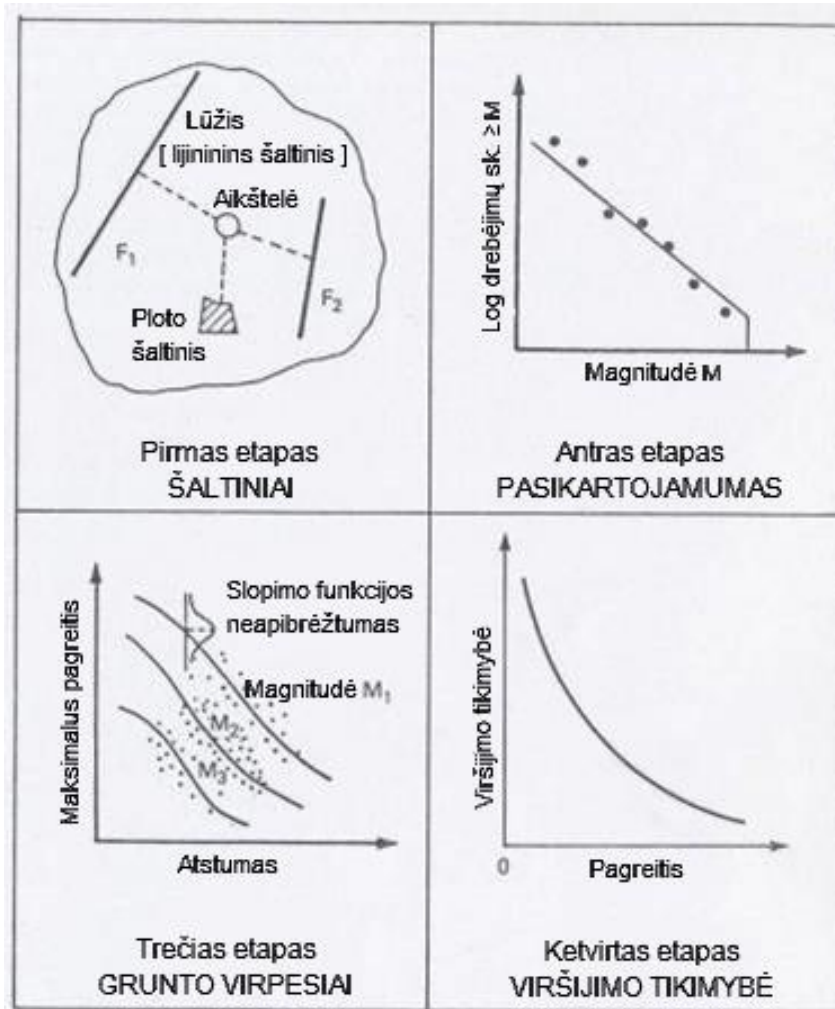
Trečiąjame etape yra parenkamos arba nustatomos grunto virpesių intensyvumo slopimo priklausomybės (dažniausiai naudojamos pikinės grunto pagreičio reikšmės – PGA) nuo epicentro iki tiriamos vietos skirtingo stiprumo seisminiams įvykiams (2.1.1 pav.). Taip pat vertinamos ir šių priklausomybių paklaidos.

Ketvirtajame etape yra skaičiuojamas tikimybinis žemės drebėjimo pavojingumas. Šiame etape yra integruojami visi galimi skirtingų stiprumų, skirtingų tikimybių, visų skirtingų SZ ir visų įmanomų epicentrinų atstumų grunto virpesiai tam tikroje vietoje ir apskaičiuojama tikimybė, kad grunto virpesiai (pvz. PGA) viršys tam tikrą ribą per tam tikrą nustatytą laiko tarpą. Atliekant tikimybinį seisminio pavojingumo vertinimą, yra priimama prielaida, kad žemės drebėjimai neturi „atminties“, t.y., kiekvienas drebėjimas vyksta nepriklausomai vienas nuo kito. Pavyzdžiui jeigu tam tikroje vietoje tam tikrame lūžyje įvyksta $M = 5,0$ magnitudės drebėjimas, tai jis neturi jokios įtakos sekančiam panašaus dydžio drebėjimui toje pačioje vietoje. Žinoma tokia prielaida nėra visiškai teisinga, nes tam tikroje vietoje įvykęs drebėjimas sumažina žemės plutos tektonines įtampas ir tikimybė, kad toje pačioje vietoje įvyks tokio pat stiprumo drebėjimas per tam tikrą trumpą laikotarpį ženkliai sumažėja. Toks žemės drebėjimų „atminties“ neturėjimas atitinka Poisson'o pasiskirstymą ir yra vadinamas Poisson'o modeliu. Naudojant Poisson'o

modelį, galima parodyti (pvz. Reiter, 1990), kad drebėjimo pasikartojumas, kurio sukeltų grunto virpesių parametras z gali viršyti tam tikrą lygį Z (pvz. tam tikrą grunto dalelių pagreitį) yra lygus tikimybei:

$$\text{Drebėjimo pasikartojumas} = -T/\ln(1 - P(Z > z)), \quad (2.1.2)$$

čia $P(Z > z)$ yra ieškoma tikimybė per laiko trukmę T . Pavyzdžiui civilinėse statybose įprastai naudojama grunto dalelių pagreičio 10% viršijimo per 50 metų tikimybė atitinka 475 metų žemės drebėjimo pasikartojumo periodą (Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004).



2.1.1 pav. Tikimybinio seisminio pavojingumo analizės principinė schema.

Remiantis šia metodika, darbe seisminio pavojingumo vertinimas buvo atliekamas etapais:

I etapas

1. Regiono seisminių įvykių katalogo sudarymas. Katalogo sudarymui naudojami visi turimi vietiniai, regioniniai ir pasauliniai įvykių katalogai.
2. Preliminarus seisminių įvykių katalogo pilnumo vertinimas. Tuo tikslu sudaromos įvykių magnitudžių pasiskirstymo skirtinguose laiko intervaluose diagramos. Gali rasti būtinybė katalogą suskirstyti į istorinių įvykių katalogą ir instrumentinių įvykių katalogą.
3. Katalogo magnitudžių konvertavimas į vieno tipo magnitudes. Geriausia magnitudes konvertuoti į momento magnitudes. Šiam konvertavimui atlikti, reikalinga surasti sąryšius tarp skirtingų magnitudžių tipų.
4. Susijusių įvykių: pirminių smūgių (forešokų), pakartotinių smūgių (afteršokų), drebėjimų spiečių ir netektoininių įvykių (indukuotų įvykių, sprogdinimų ir t.t.) pašalinimas iš katalogo. Šiame žingsnyje reikalinga ieškoti seisminių įvykių klasterių laike ir erdvėje, nagrinėti įvykių pasiskirstymą įvairiais laiko intervalais.
5. Katalogo pilnumo vertinimas. Katalogo pilnumas paaiškėja tik po keleto magnitudžių unifikavimo ir susijusių įvykių “valymo” iteracijų. Todėl reikalinga keletą kartų kartoti 2–4 žingsnius, kol bus gautas pakankamai patikimas ir vienalytis katalogas.
6. Pilno katalogo dalies išskyrimas. Surandama katalogo dalis, kurioje yra visi įvykiai, su magnitudėmis didesnėmis už pasirinktą slenkstinę, ir kur magnitudės yra unifikuotos.
7. Nagrinėjamo regiono seismingumo žemėlapiu paruošimas. Katalogo įvykiai atvaizduojami ant žemėlapiu, pagal skirtingas įvykių koncentracijas, išskiriamos SZ.

8. SZ tikslinimas. Pasitelkus visą turimą geologinę, geofizikinę, seismotektoninę, paleoseisminę ir pan. Informaciją, koreguojamos ir tikslinamos SZ ribos.
9. SZ ribų apibrėžimas. Reikalinga sudaryti poligonus ribojančius kiekvieną SZ bei sudaryti kiekvienos SZ įvykių subkatalogus.

II etapas

10. SZ reikšminių parametrų nustatymas. Jeigu SZ yra charakterizuojamos išsklaidytu (difuziniu) seismingumu, tai yra priimama prielaida, kad įvykiai kiekvienoje zonoje erdviškai pasiskirsto tolygiai, o laikinis pasiskirstymas atitinka Poisson'o procesą. Tai reiškia, kad įvykių skaičius kiekvienoje SZ, įvykstantis per metus, yra nusakomas Gutenberg-Richter'io sąryšiu (lygtis 2.1.1). Taip pat siekiant kiekybiškai įvertinti kiekvieną SZ, yra nustatomi sekantys parametrai:

- a) Katalogo laiko intervalas – tai yra laiko intervalas, kuriame katalogas laikomas pilnu.
- b) Įvykių skaičius, kurių magnitudės viršija pasirinktą slenkstinę magnitudę M_0 per tam tikrą laiką, dažniausiai per vienus metus. Šis parametras atitinka Gutenberg-Richter'io sąryšio a parametro reikšmę.
- c) Gutenberg-Richter'io sąryšio b parametro reikšmė. Parametras b nusako kokiomis proporcijomis pasiskirsto skirtingų magnitudžių žemės drebėjimai tam tikroje zonoje.
- d) Maksimali stebėta magnitudė (M_{obs}). Tai maksimali magnitudė, kuri buvo stebėta konkrečioje SZ.
- e) Maksimaliai galima magnitudė (M_{max}) ir jos standartinis nuokrypis konkrečioje SZ. Pastarasis parametras nustatomas iš turimų geologinių, paleoseisminių duomenų arba subjektyviu eksperto vertinimu. Dažniausiai mažai seismiškai aktyviems regionams maksimali galima magnitudė yra prilyginama maksimaliai stebėtai magnitudėi plius 0,5 magnitudės paklaidą (pvz. dePolo and Slemmons, 1990; Chen and Scawthorn, 2003).

f) Apatinė ribinė magnitudė (M_{\min}), t.y. magnitudė, kuri parenkama atsižvelgiant į inžinierinius reikalavimus. Paprastai yra laikoma, kad magnitudės mažesnės nei 4,0 yra nereikšmingos inžinieriniuose skaičiavimuose (Bender and Campbell, 1989).

11. Nustatymas, ar regione galima identifikuoti charakteringus seisminius įvykius, t.y. seisminius įvykius, kurie kas tam tikrą laiką pasikartoja tam tikroje vietoje.

III etapas

12. Nagrinėjamo regiono seisminių virpesių slopimo funkcijos radimas. Ši funkcija gali būti gaunama iš empirinių vertinimų, arba iš teorinių skaičiavimų. Taip pat galima naudoti tinkamas kitų tyrėjų nustatytas seisminių virpesių slopimo funkcijas.

IV etapas

13. Pradinių parametrų paruošimas atitinkamai programinei įrangai, su kuria bus atliekami tikimybiniai seisminio pavojingumo skaičiavimai.

14. Įvykdyti tikimybinis seisminio pavojingumo skaičiavimus su pasirinkta programine įranga.

15. 6–14 šios procedūros žingsnių kartojimas, tol kol seisminis modelis ir galutiniai rezultatai taps pakankamai patikimi.

16. Nagrinėjamo regiono seisminio pavojaus žemėlapiu sudarymas. Naudojantis pasirinktosios programinės įrangos sugeneruotais rezultatais, reikalinga sudaryti regiono seisminio pavojingumo žemėlapi, pvz. vaizduojantį grunto dalelių pagreičius (PGA), kurie gali būti viršyti per tam tikrą laiką su tam tikra tikimybe.

17. Vietinių sąlygų įvertinimas svarbesnėse vietovėse. Jeigu įmanoma, reikėtų bandyti įvertinti vietines grunto sąlygas ir grunto įtaką seisminiam pavojui.

Neapibrėžtumo vertinimas

Vienas iš esminių TSPV metodo taikymo aspektų yra paklaidų įvertinimas. *Atsitiktinės paklaidos* atsiranda dėl Žemės drebėjimams būdingo procesų atsitiktinumo. Kita vertus reikalinga vertinti ir paklaidas, kurios atsiranda sudarant seismotektoninius modelius dėl žinių trūkumo, – šio tipo paklaidos vadinamos *sistemosiomis*. Seisminio pavojingumo skaičiavimuose yra labai svarbu suvokti šių dviejų tipų paklaidų skirtumus ir numatyti kaip atitinkamai jas vertinti seisminio pavojingumo skaičiavimo procese.

Atsitiktinės paklaidos yra apibrėžiamos kaip atsiradusios dėl paties žemės drebėjimo proceso atsitiktinumo. Diskretiniai kintamieji yra apibūdinami tam tikros vertės tikimybe, funkcijos yra charakterizuojamos tikimybės tankio funkcija nusakančia parametro pasiskirstymą (pvz. magnitudės pasiskirstymą). TSPV skaičiavimuose atsitiktinės paklaidos yra tiesiogiai naudojamos pačiuose skaičiavimuose, ypač per standartinio nuokrypio parametrus, ir tokiu būdu tiesiogiai įtakoja tam tikros vietos seisminio pavojingumo dydį (Abrahamson and Bommer, 2005).

Sistemosios paklaidos dažnai yra suprantamos kaip žinių paklaidos, kadangi jos atsiranda dėl riboto duomenų ar žinių kiekio. Skirtingai nuo sistemingųjų paklaidų, atsitiktinės paklaidos gali būti sumažintos atlikus daugiau matavimų ar eksperimentų. Sistemosios paklaidos atsiranda ne dėl atsitiktinių parametrų, bet greičiau dėl parametrų turinčių tam tikras vertes, kurių, deja mes nežinome. Sistemosios paklaidos yra charakterizuojamos alternatyviais modeliais arba alternatyviomis tikimybės tankio funkcijomis. Todėl sistemosios paklaidos arba neapibrėžtumai nėra analizuojami tiesiogiai TSPV skaičiavimuose, bet bandoma sukurti alternatyvius modelius, kurie leidžia apskaičiuoti tuos modelius atitinkančius seisminius pavojingumus (Abrahamson and Bommer, 2005).

Siekiant įvertinti sistemingasias paklaidas, dažniausiai šiuolaikinėje TSPV metodikos praktikoje yra naudojama loginio medžio metodika. Kaip minėta,

sistemiškas paklaidas bandoma vertinti sukuriant visą eilę skirtingų modelių. Tarkim skirtingi tyrėjai gali išskirti gana skirtingų geometrinių pavidalų ir charakteristikų SZ. SZ gali būti charakterizuojamos skirtingo dydžio parametrais (pvz. M_{\min} , M_{\max} ar b parametru). Taip pat gali būti naudojamos skirtingos seisminių virpesių slopimo funkcijos. Tokiu būdu bus galima apskaičiuoti nagrinėjamos teritorijos seisminius pavojingumus atitinkančius skirtingus seismotektoninius modelius. Loginis medis yra gana paprastas ir efektyvus būdas valdyti daugelį alternatyvių modelių ir analizuoti gaunamus rezultatus. Šiame darbe naudoto loginio medžio pavyzdys yra pateiktas 3.4.1 pav.

2.2. SEISMINIO PAVOJINGUMO MODELIAVIMO PRIEMONĖS

Rytų Baltijos regiono jungtinio seisminio katalogo sudarymui, jo analizei ir „išgryninimui“ buvo naudotas SEISAN 8.3 (Havskov and Ottemöller, 1999), vėliau SEISAN 9.1 programų paketas (Ottemöller et al., 2012). Taip pat šis programų paketas buvo naudotas konvertuojant įvairias jungtinio katalogo magnitudes į vieno tipo magnitudę, sudarant kiekvieno SZ subkatalogus, skaičiuojant SZ b ir a parametrų vertes.

Jungtinio katalogo pilnumo laike analizei, grunto virpesių slopimo funkcijų analizei ir jų lentelių sudarymui, apskaičiuotų PGA lentelių analizei ir sisteminimui, grunto dalelių pagreičių spektrų atvaizdavimui ir kitai duomenų analizei bei grafikų sudarymui buvo naudota Microsoft Exel 2010 programa.

Tektoninių žemėlapių ir jungtinio seisminio katalogo analizei ir jų atvaizdavimui pradžioje buvo naudota GIS programa MapInfo 8.5²⁷, vėliau naudota atviro kodo GIS programa QGIS 2.8²⁸.

Seisminio pavojingumo modeliavimui, o būtent duomenų, reikalingų Rytų Baltijos regiono PGA žemėlapių sudarymui ir grunto dalelių pagreičių

²⁷ <http://www.directionsmag.com/entry/product-review-mapinfo-professional-version-85/123037>, žiūrėta 2015.09.05.

spektrų sudarymui, buvo naudota CRISIS 2007 programa²⁹ (Ordaz M. et al., 2013).

Tiriamos regiono PGA žemėlapių sudarymui buvo naudotas GMT 4.5 (Generic Mapping Tool) programų paketas³⁰.

2.3. DUOMENŲ ŠALTINIAI

Seisminio pavojingumo vertinimui būtini dviejų tipų pagrindiniai įvadiniai duomenys.

Svarbiausia vertinime yra regiono seisminio aktyvumo informacija, t.y. žinios apie anksčiau įvykusius žemės drebėjimus, jų vietas ir laikai, parametrai: magnitudės, hipocentro gyliai. Šios informacijos pagrindu sudaromas seisminis katalogas. Šie duomenys buvo surinkti iš jau publikuotų šaltinių ar internete laisvai prieinamų duomenų: Baltarusijos, Baltijos šalių katalogo (Аронова, 2007), Jungtinio Rytų Europos platformos teritorijų žemės drebėjimų katalogo, apimančiu laikmetį nuo seniausių laikų iki 2005 metų (Шаров Н. В. и др., 2007) ir Šiaurės šalių seisminių įvykių duomenų bazės (sutrumpintai vadinamas FENCAT), kuri tvarko ir palaiko HUSI. Be šių šaltinių papildomi buvo nagrinėti ir naudoti atskirose publikacijose pateikti duomenys pvz., Nikonov and Sildvee (1991); Gregersen et al. (2007); Guterch (2009).

Baltarusijos ir Baltijos šalių katalogas („agentūros pavadinimas“ – BLR) didžiąja dalimi sudarytas iš istorinių įvykių. Šiame kataloge įtraukti ir mažesnių magnitudžių įvykiai, kurie nebuvo rasti kituose kataloguose. Be to, šiame kataloge pateikti gana išsamūs kiekvieno įvykio aprašymai, cituojant pirminius šaltinius.

Jungtinis Rytų Europos platformos žemės drebėjimų katalogas („agentūros pavadinimas“ – EEP) buvo sudarytas remiantis Specializuotu

²⁸ <http://www.qgis.org/en/site/about/index.html>, žiūrėta 2015.09.05.

²⁹ <http://www.ecapra.org/crisis-2007>, žiūrėta 2015.09.05.

Šiaurinės Eurazijos žemės drebėjimų katalogu, apimančiu laikotarpį nuo seniausių laikų iki 1995 m.³¹, kurį, vykdant Rusijos teritorijos seisminių rajonavimą, sudarė didelė Rusijos seismologų grupė, vadovaujama N. V. Kondorskaya ir V. I. Ulomovov. Šis katalogas apėmė Rytų Europą ir dalį aplinkinių teritorijų.

FENCAT yra bene pilniausias ir autoritetingiausias Šiaurinės Europos seisminių vykių katalogas (agentūros pavadinimas – HEL). Istorinė katalogo dalis pradedama įvykiu, fiksuotu 1375 m., o duomenys apie paskutinių dešimtmečių įvykius surinkti ir apibendrinti iš daugelio Fenoskandijos šalių seisminių stočių. Taip pat šiame kataloge identifikuojami natūralios prigimties ir žmogaus veiklos sukelti seisminiai įvykiai, todėl netektoninės kilmės įvykius lengva eliminuoti.

Kitas duomenų masyvas remiasi regiono tektonine informacija. Modeliuojant seisminį pavojingumą būtina išskirti seismiškai aktyvias zonas (linijines arba plotines). Tam tikslui buvo pasitelkti sekantys tektoniniai žemėlapiai: Аронова (2007), 3.1.2 pav.; Aizberg et al. (1999), 3.1.3 pav.; Stirpeika (1999), Grigelis (1981), 3.1.4 pav.; Сувейздис (1979).

Šio darbo pagrindinis uždavinys buvo įvertinti Rytų Baltijos seisminį pavojingumą naudojant TSPV metodiką. Todėl čia nevo nuodugniai tyrinėta Vrančos SZ. Reikalinga informacija Vrančos SZ apibudinti paimta iš Mantiniemi et al. (2003) publikacijos.

³⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Generic_Mapping_Tools, žiūrėta 2015.09.05.

³¹ <http://www.scgis.ru>, System of data bases, 1996, žiūrėta 2015.09.10

3. RYTŲ BALTIJOS REGIONO SEISMINIO PAVOJINGUMO VERTINIMAS

3.1. ŽEMĖS DREBĖJIMŲ KATALOGAS IR SEISMOGENINIŲ ZONŲ IŠSKYRIMAS

Seisminių įvykių katalogo (duomenų bazės) sudarymas

Kaip minėta 2.3 poskyryje, Rytinės Baltijos regiono seisminių įvykių katalogas buvo sudarytas remiantis trimis pagrindiniais šaltiniais: Baltarusijos, Baltijos šalių katalogu (Аронова, 2007), Jungtiniu Rytų Europos platformos teritorijų žemės drebėjimų katalogu, apimančiu laikmetį nuo seniausių laikų iki 2005 metų (Шаров Н. В. и др., 2007) ir Šiaurės šalių seisminių įvykių duomenų baze (FENCAT), kurią tvarko ir palaiko HUSI.

Kai pirminių katalogų duomenys persidengia erdvėje ir laike, tas pats seisminis įvykis gali būti įtraukiamas į kelis duomenų rinkinius. Daug pastangų buvo dėta analizuojant įrašus, įtrauktus į šaltinių katalogus, ir ieškant dublikatų. Dublikatų identifikavimas skirtinguose duomenų rinkiniuose buvo paremtas, lyginant:

- įvykio laiką;
- epicentro koordinatės;
- žemės drebėjimo magnitudę;
- seisminio įrašo nuorodą.

Dažniausiai du įvykiai buvo laikomi dublikatais, kai įvykių laiko, epicentrų koordinatėms ir magnitudžių verčių skirtumai yra mažesni už tam tikras pasirinktas vertes. Šis būdas nebuvo visiškai tinkamas šio darbo jungtiniam katalogui, nes pradiniuose kataloguose daugelio žemės drebėjimų epicentrų koordinatės nebuvo pakankamai tikslios (pvz., du ar daugiau artimų laike įrašų, turinčių daug skirtumų, susieti pagal magnitudžių skirtumus). Taigi, buvo atlikta patikra siekiant nustatyti dublikatus ir atrinkti reikiamus įrašus kataloge. Kai

analogiški žemės drebėjimai buvo identifikuoti, buvo paliekamas tik vienas įrašas galutiniame kataloge, pritaikius hierarchijos schemą.

Remiantis istoriniais įvykiais (iki 1964 metų), Baltarusijos ir Baltijos šalių katalogas (Аронова, 2007) buvo laikomas tiksliausiu tiriamai teritorijai, po to FENCAT ir galiausiai Jungtinis Rytų Europos platformos katalogas (Шапов Н. В. и др., 2007). Tačiau galutiniame kataloge tam tikrų įvykių parametrai buvo imami ir iš Jungtinio Rytų Europos platformos katalogo, nes, subjektyviu vertinimu, jie laikyti patikimesniais.

Tradicinis PSHA metodas yra pagrįstas prielaida, kad žemės drebėjimai yra atsitiktiniai įvykiai, kurie laike pasiskirsto pagal Poisson'o priklausomybę. Seismingumo analizė atliekama remiantis žemės drebėjimų katalogu, iš kurio susiję įvykiai yra pašalinami, siekiant, kad duomenys atitiktų šią prielaidą. Priklausomi įvykiai, tokie kaip pirminiai smūgiai („forešokai“) ir pakartotiniai smūgiai („afteršokai“) turi būti nustatyti ir pašalinti, ir tik pagrindinis seisminis smūgis yra įtraukiamas į galutinį katalogą.

Pirminiai smūgiai ir pakartotiniai smūgiai buvo nustatomi naudojant Gardner and Knopoff (1974) metodą. Šis metodas identifikuoja priklausomus įvykius pagal jų erdvinį ir laiko žemės drebėjimų sekų tęstinumą kaip pagrindinio smūgio magnitudės M funkciją. Žemės drebėjimas yra identifikuojamas kaip i -tasis sekos narys, jei yra lokalizuojamas $D_i(M)$ km plote ir įvyksta per $T_i(M)$ dienų nuo pagrindinio smūgio. Tik stipriausi požeminiai smūgiai iš kiekvienos grupės yra įrašomi į katalogą. Šis metodas (Gardner and Knopoff, 1974) buvo pritaikytas jungtiniam kataloge, siekiant atskirti pirminius smūgius (F), pakartotinius smūgius (A).

Jungtinis Rytinio Baltijos regiono seisminių įvykių katalogas yra pateiktas 3.1.1 lentelėje ir 3.1.1 pav.

Magnitudžių suvienodinimas ir katalogo „išvalymas“

Jungtinis Rytų Baltijos katalogas buvo sudarytas naudojantis keliais skirtingais katalogais, todėl kiekvienas seisminis įvykis buvo apibūdintas tokia magnitute, kokia jam buvo priskirta pirminiame šaltinyje.

Baltarusijos ir Baltijos šalių kataloge bei Jungtiniame Rytų Europos platformos kataloge įvykių stiprumams apibrėžti naudotos lokalsios magnitudės (LBLR – Baltarusijos ir Baltijos šalių katalogo lokalsi magnitudės; LEEP – Jungtinio Rytų Europos platformos katalogo lokalsi magnitudė). FENCAT kataloge dažniausiai buvo naudota HUSI nustatyta lokalsi magnitudė (LHEL). Instrumentinėje FENCAT katalogo dalyje keletas įvykių buvo įvertinti Bergeno universiteto seismologijos observatorijos kodos (CBER) ir lokalsiomis (LBER) magnitudėmis. Siekiant konvertuoti CBER ir LBER magnitudes į LHEL magnitudes buvo pasinaudota pilnu 1980–2009 metų FENCAT katalogu ir programa „MAG“ iš paketo SEISAN 8.3 (Havskov and Ottemöller, 1999). Nustatytas sąryšis tarp LHEL ir CBER magnitudžių:

$$LHEL = 1,562 * CBER - 1,664 \quad (3.1.1)$$

bei sąryšis tarp LHEL bei LBER magnitudžių:

$$LHEL = 1,205 * LBER - 0,146. \quad (3.1.2)$$

Naudojantis šiais sąryšiais CBER ir LBER magnitudės Jungtiniame Rytų Baltijos kataloge konvertuotos į LHEL tipo magnitudes.

Didesnioji seisminių įvykių magnitudžių dalis tiek Baltarusijos ir Baltijos šalių kataloge, tiek Jungtinio Rytų Europos platformos teritorijų žemės drebėjimų kataloge tiek ir FENCAT kataloge buvo įvertinta lokalsiomis magnitudėmis. Lokalsios magnitudės gali turėti gana dideles paklaidas iki 1,0–1,5 vertės, tačiau mažų magnitudžių suvienodinimas ir jų perskaičiavimas į momento magnitudes, kurios yra geriausiai tinkamos vertinant seisminį

pavojingumą, yra gana sudėtingas ir nevienareikšmis uždavinys, kuris bus specialiai sprendžiamas ateityje (Шаров Н. В. и др., 2007). Todėl nesant galimybės lokalias magnitudes konvertuoti į momento magnitudes, buvo nuspręsta Jungtiniame Rytų Baltijos kataloge palikti lokalias magnitudes ir priimti prielaidą, kad jos nuo momento magnitudžių beveik nesiskiria.

3.1.1 lentelė. Pilna (neeliminuoti pirminiai ir pakartotiniai smūgiai) Rytinės Baltijos regiono seisminių įvykių katalogas. Katalogas pateiktas sutrumpintu NORDIC formatu. Magnitudžių tipai: W – momento magnitudė, L – lokali magnitudė, B – tūrinių bangų magnitudė, C – kodos magnitudė, M – makroseisminė, I – intensyvumas epicentre. Simbolis einantis po įvykio identifikatoriaus „L“ – detalizuojanti informacija: F – smūgis prieš pagrindinį smūgį (forešokas), A – pakartotinas smūgis (afteršokas). Seisminių įvykių koordinatės pateiktos WDS84 geografinėje koordinatžių sistemoje, laipsniais ir dešimtainėmis laipsnių dalimis. Seismologijos centrai ir duomenų šaltiniai: BLR – Аронова (2007); EEP – Jungtinis Rytų Europos platformos žemės drebėjimų katalogas (Шаров Н. В. и др., 2007); BER – Bergeno universiteto, Seismologijos observatorija; HEL – Helsinkio universiteto, Seismologijos institutas; NAO – NORSAR seisminių tyrimų centras; UPP – Upsalos universiteto Seismologijos observatorija; USG – JAV Geologijos tarnyba; DNS – Nikonov and Sildvee, pagal Doss, 1987; GRE – Gregersen et al., 2007; KJW – Wahlström, pagal Kjellen, 1990; POL – Guterch, 2009; WAH – Wahlström and Ahjos, 1987.

YYYY	MMDD	mmhh	ss.s	RI	Latitud	Lonitude	Depth	AGENSt	RES	MAG1AGE	MAG1AGE	MAG1AGE
1375				L	57.500	18.500	10.0	KJW		4.0LKJW		1
1540				L	57.700	18.700	5.0	KJW		4.3LKJW		1
1602				L	59.500	24.700	5.0	BLR		3.8LBLR	6.0IBLR	1
1607				L	59.700	24.700	5.0	BLR		3.8LBLR	6.0IBLR	1
1616	0630	0530		L	56.400	24.200	5.0	EEP		4.1LEEP	6.5IBLR	1
1670	0201	22		L	58.400	24.500	8.0	DNS		3.9LBLR	3.9 DNS	6.0IBLR1
1783	03			L	56.900	23.600		BLR		4.0LBLR	4.0IBLR	1
1785	1011			L	57.400	21.600		BLR		3.5LBLR	3.5IDNS	5.0IBLR1
1803	0108	2315		L	53.100	23.100	5.0	BLR		3.6LEEP	6.0IBLR	3.6 BLR1
1807	0223	03		LF	56.900	24.000	5.0	BLR		3.0LBLR	3.0IDNS	3.5IBLR1
1821	0220	08		LF	56.600	25.300		BLR		2.5LBLR	2.5IBLR	1
1821	0221	0330		LF	56.600	25.300	3.0	BLR		4.0LBLR	6.5IBLR	1
1821	0222	04		LF	56.600	25.300		BLR		2.5LBLR	2.5IBLR	1
1821	0222	07		LF	56.600	25.300		BLR		2.5LBLR	2.5IBLR	1
1821	0222	0730		L	56.600	25.300	13.0	EEP		4.5LEEP	7.0IBLR	4.5 BLR1
1821	0223			LA	56.600	25.300		BLR		2.5LBLR	2.5IBLR	1
1823	0206	00		L	58.000	26.200	7.0	DNS		3.9LBLR	7.0IBLR	3.9 DNS1
1827	0928	12		L	59.000	23.500	14.0	EEP		4.0LEEP	4.0 DNS	5.0IBLR1
1844	0112	22		L	58.600	23.700	6.0	BLR		2.5LBLR	2.5 DNS	4.0IBLR1
1853	0205	0145		LF	56.800	25.700		BLR		2.9LBLR	5.0IBLR	3.5IDNS1
1853	0205	02		L	56.700	25.600		BLR		3.5LBLR	6.0IBLR	2.9IDNS1
1853	0326	0130		L	59.500	24.700	5.0	BLR		1.2LBLR	1.2 DNS	2.5IBLR1
1853	1229	2345		L	56.960	24.130		BLR		3.5LBLR	3.5IDNS	6.0IBLR1
1854	0105	04		LA	56.960	24.130		BLR		2.9LBLR	2.9IDNS	4.0IBLR1
1857	0518	09		L	57.700	22.200	10.0	EEP		4.5LEEP	3.0 DNS	7.0IBLR1
1858	0115	1410		L	59.300	22.600	8.0	BLR		3.0LBLR	3.0 DNS	5.0IBLR1
1869	0215	03		L	59.500	24.700	6.0	BLR		2.5LBLR	2.5 DNS	5.0IRBS1

1870	0206	0445	L	56.960	24.130		BLR	3.5LBLR	3.5IDNS	5.0IBLR1	
1870	0206	0520	LA	56.960	24.130		BLR	2.9LBLR	2.9IDNS	4.0IBLR1	
1870	0211		LA	56.960	24.130		BLR	2.5LBLR	4.0IBLR		1
1877	1016	0525	L	58.900	23.400	10.0	EEP	4.2LEEP	3.5 DNS	6.0IBLR1	
1881	0128	1415	L	59.400	28.200	4.0	BLR	3.2LBLR	3.0 DNS	5.5IBLR1	
1887	1210		L	54.200	28.500	10.0	EEP	3.7LEEP	6.0IBLR		1
1896	0920	15	L	56.600	23.700	5.0	EEP	3.5LEEP	3.5IDNS	5.0IBLR1	
1907	0122	02	L	56.900	24.070	7.0	EEP	3.5LEEP	5.0IBLR	3.5 BLR1	
1908	1228	05	L	54.600	25.800	9.0	BLR	4.5LEEP	7.0IBLR	4.5 BLR1	
1908	1228	20	LF	56.900	24.140		BLR	2.9LBLR	4.0IBLR		1
1908	1228	2245	LF	57.000	24.150		BLR	2.9LBLR	4.0IBLR		1
1908	1229	01	L	56.800	26.300	10.0	EEP	4.5LEEP	7.0IBLR	4.5 BLR1	
1908	1229	0330	L	56.940	24.070	10.0	BLR	3.5LBLR	5.5IBLR		1
1908	1229	22	L	55.800	26.700	11.0	EEP	4.5LEEP	6.5IBLR	4.5 BLR1	
1908	1229		L	57.500	25.700		BLR	3.5LBLR	6.0IBLR		1
1908	1230		L	54.308	22.300		POL	3.0LBLR	4.0IPOL		1
1908	1230	05	LA	56.940	24.070	10.0	BLR	2.9LBLR	5.0IBLR		1
1908	1231	04	LA	56.950	24.000		BLR	3.5LBLR	6.0IBLR		1
1909	0131	0715	L	56.900	24.100	6.0	EEP	3.5LEEP	5.0IBLR	3.5 BLR1	
1909	0212	01	L	56.560	21.090		BLR	3.5LBLR	3.0IBLR		1
1909	0602	0830	L	58.400	25.600	7.0	BLR	1.8LBLR	1.8 DNS	3.0IBLR1	
1910	0521	03	L	56.950	24.050	10.0	EEP	4.0LEEP	4.0 BLR	6.0IBLR1	
1912	0408	1630	LF	59.700	25.000	5.0	BLR	2.0LBLR	2.0 DNS	3.0IBLR1	
1912	0408	2315	LF	59.700	25.000	5.0	BLR	1.6LBLR	1.6WDNS	2.0IBLR1	
1912	0615		L	59.700	25.000	6.0	BLR	2.0LBLR	2.0 DNS	3.5IBLR1	
1931	0712	22	L	59.400	25.300	5.0	BLR	3.0LBLR	4.5IBLR		1
1932	0210		L	52.600	20.030		POL	4.3MPOL	6.0IPOL		1
1932	0224		LA	52.600	20.030		POL	4.3MPOL	6.0IPOL		1
1972	0904	0026	33.0 L	57.100	18.400		WAH	2.4LWAH			1
1976	1025	0839	45.0 L	59.260	23.390	10.0	EEP	4.7LEEP	6.5IBLR		1
1976	1025	0849	LA	59.300	23.500	10.0	EEP	3.5LBLR	3.5 DNS	4.5IBLR1	
1976	1025	0907	LA	59.300	23.500	12.0	BLR	3.0LBLR	3.0 DNS	3.5IBLR1	
1976	1108	1017	01.0 LA	59.320	23.460		EEP	3.5LEEP	4.5IBLR		1
1976	1122	1214	42.5 LA	59.320	23.420	13.0	BLR	3.0LBLR	2.5 DNS	3.0IBLR1	
1978	0510	0905	L	52.800	27.700	10.0	EEP	3.5LEEP	3.5 BLR	4.5IBLR1	
1979	0724	1602	46.4 L	55.450	19.700		HEL	2.7LHEL			1
1980	0109	0124	52.4 L	58.910	22.990		HEL	2.4LHEL			1
1981	0622	1927	37.7 L	59.450	22.660	7.0	HEL	2.6LHEL			1
1982	0602	0758	17.7 L	57.040	21.940		HEL	2.3LHEL			1
1983	1201	2226	34.0 L	52.950	27.810	7.0	BLR	2.8LBLR	4.5IBLR		1
1985	1017	0132	24.0 L	52.900	28.400	7.0	EEP	3.5LEEP	4.0IBLR	3.4 BLR1	
1987	0407	2301	28.0 LF	58.300	26.100	10.0	BLR	2.7LBLR	3.5IBLR		1
1987	0408	2302	22.0 L	58.400	26.100	14.0	BLR	3.5LBLR	3.5 DNS	5.0IBLR1	
1987	0705	0242	11.7 L	58.300	26.000	8.0	BLR	2.9LBLR	3.5IBLR		1
1987	0922	1825	L	58.700	26.400	9.0	BLR	3.0LBLR	4.5IBLR		1
1988	0429	1536	52.0 L	56.970	19.530	1.0	BER	3.3CBER			1
1988	0429	1541	22.7 L	56.320	21.400	7.0	BER	3.2CBER	3.1LBER		1
1988	0902	1917	L	58.800	26.400	7.0	BLR	2.9LBLR	5.0IBLR		1
1994	0312	0756	58.6 L	55.200	17.910	0.0	BER	2.4LBER			1
1994	0601	1640	30.0 L	53.750	22.790		NAO	4.0MPOL	5.5IPOL	2.3LNAO1	
1995	0306	1024	24.3 L	55.040	30.820	18.0	BER	2.2LBER			1
2002	1218	2114	21.9 L	55.888	18.203	2.2	BER	17 0.5	3.5LHEL	4.2BUSG	3.5LBER1
2003	0112	1143	47.8 L	59.402	23.415	10.0F	HEL	8 1.0	1.2LHEL		1
2004	0128	1540	00.2 L	58.792	23.851	10.0F	HEL	9 0.9	1.6LHEL		1
2004	0921	1105	04.8 LF	54.774	20.040	10.0F	HEL	53 0.5	5.0WGRE	4.5WBER	4.8LHEL1
2004	0921	1332	31.9 L	54.834	20.025	10.0F	HEL	71 0.8	5.2WGRE	4.7WHRV	5.2LUPP1
2004	0921	1336	33.8 LA	54.870	19.990	3.0	BLR		3.0LBLR	3.0IBLR	1
2006	1106	0111	40.3 L	59.677	24.857	2.7	HEL	5 0.1	1.1LHEL		1

Toliau papildomai analizuojant įvykių pasiskirstymą laike ir jų epicentru koordinatas bei atsižvelgiant į pirminius katalogus, dar kartą patikrinti ir atitinkamai pažymėti pakartotiniai smūgiai, pirminiai smūgiai. Galiausiai visi susiję įvykiai buvo pašalinti iš Jungtinio Rytų Baltijos katalogo ir gautas galutinis „išvalytas“ katalogas(3.1.2 lentelė).

Rytų Baltijos regiono tektoniniai žemėlapiai

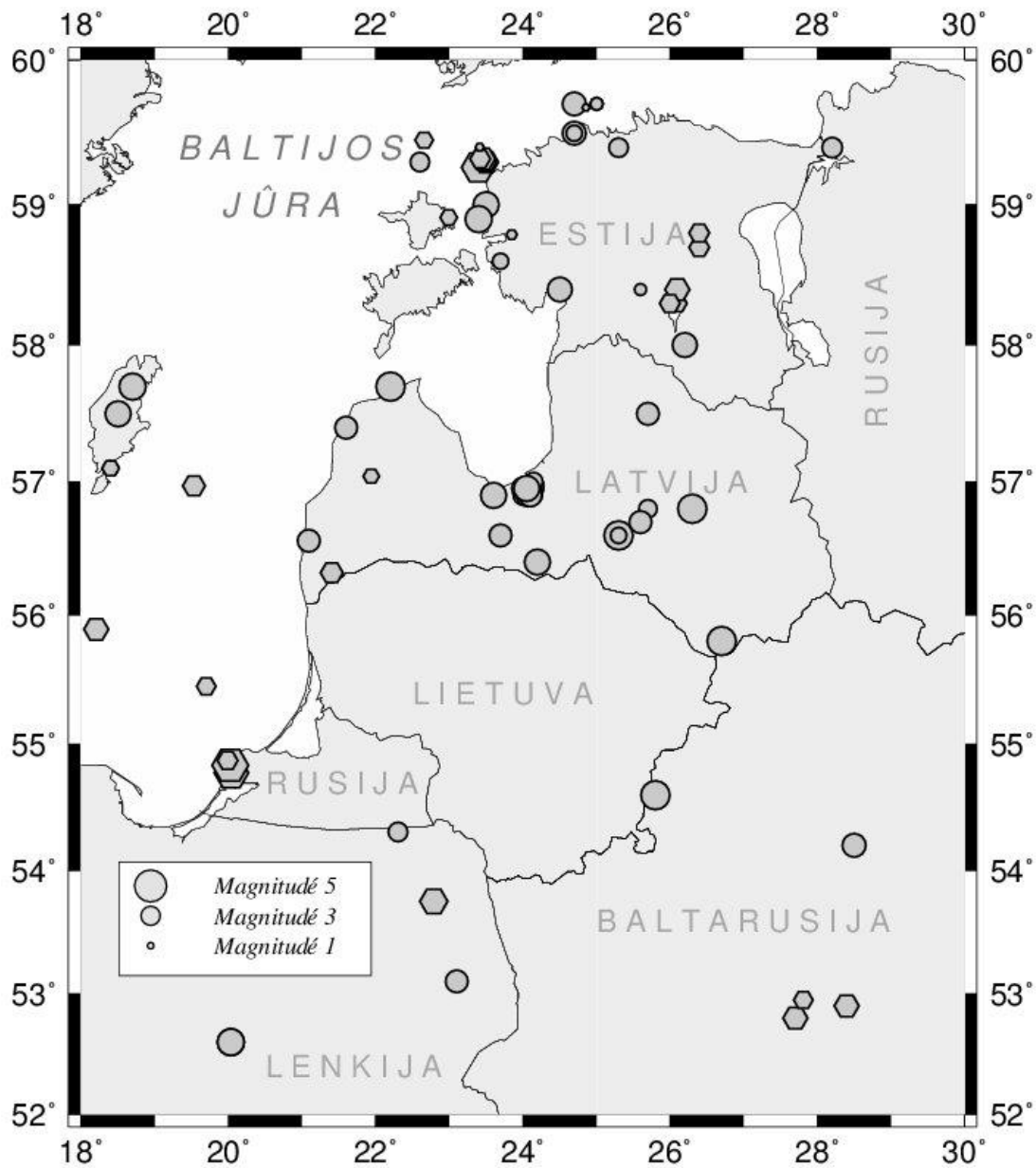
Pasaulio geologinio žemėlapių komisija, esanti Tarptautinės geologinių mokslų sąjungos (IUGS) padalinys, 2002 m. išleido pirmą Pasaulio seismotektoninį žemėlapi (mastelis 1:25 000 000). Šiame žemėlapyje, matyt dėl planetinio mastelio, Rytų Baltijos regione nėra pažymėto nei vieno tektoninio lūžio. Artimiausi lūžai vaizduojami Fenoskandijoje. Todėl Pasaulio seismotektoninis žemėlapis negalėjo būti naudojamas Rytų Baltijos SZ išskyrimui.

3.1.2 lentelė. Galutinis (išvalytas) Rytų Baltijos regiono seisminių įvykių katalogas. Pažymėjimų ir sutrumpinimų reikšmės žr. 3.1.1 lentelėje.

YYYY	MMDD	mmhh	ss.s	R	Latitud	Lonitude	Depth	AGENSt	RES	MAG1AGE	MAG1AGE	MAG1AGE
1375				L	57.500	18.500	10.0	KJW		4.0LKJW		1
1540				L	57.700	18.700	5.0	KJW		4.3LKJW		1
1602				L	59.500	24.700	5.0	BLR		3.8LBLR	6.0IBLR	1
1607				L	59.700	24.700	5.0	BLR		3.8LBLR	6.0IBLR	1
1616	0630	0530		L	56.400	24.200	5.0	EEP		4.1LEEP	6.5IBLR	1
1670	0201	22		L	58.400	24.500	8.0	DNS		3.9LBLR	3.9 DNS	6.0IBLR1
1783	03			L	56.900	23.600		BLR		4.0LBLR	4.0IBLR	1
1785	1011			L	57.400	21.600		BLR		3.5LBLR	3.5IDNS	5.0IBLR1
1803	0108	2315		L	53.100	23.100	5.0	BLR		3.6LEEP	6.0IBLR	3.6 BLR1
1821	0222	0730		L	56.600	25.300	13.0	EEP		4.5LEEP	7.0IBLR	4.5 BLR1
1823	0206	00		L	58.000	26.200	7.0	DNS		3.9LBLR	7.0IBLR	3.9 DNS1
1827	0928	12		L	59.000	23.500	14.0	EEP		4.0LEEP	4.0 DNS	5.0IBLR1
1844	0112	22		L	58.600	23.700	6.0	BLR		2.5LBLR	2.5 DNS	4.0IBLR1
1853	0205	02		L	56.700	25.600		BLR		3.5LBLR	6.0IBLR	2.9IDNS1
1853	0326	0130		L	59.500	24.700	5.0	BLR		1.2LBLR	1.2 DNS	2.5IBLR1
1853	1229	2345		L	56.960	24.130		BLR		3.5LBLR	3.5IDNS	6.0IBLR1
1857	0518	09		L	57.700	22.200	10.0	EEP		4.5LEEP	3.0 DNS	7.0IBLR1
1858	0115	1410		L	59.300	22.600	8.0	BLR		3.0LBLR	3.0 DNS	5.0IBLR1
1869	0215	03		L	59.500	24.700	6.0	BLR		2.5LBLR	2.5 DNS	5.0IRBS1
1870	0206	0445		L	56.960	24.130		BLR		3.5LBLR	3.5IDNS	5.0IBLR1
1877	1016	0525		L	58.900	23.400	10.0	EEP		4.2LEEP	3.5 DNS	6.0IBLR1
1881	0128	1415		L	59.400	28.200	4.0	BLR		3.2LBLR	3.0 DNS	5.5IBLR1
1887	1210			L	54.200	28.500	10.0	EEP		3.7LEEP	6.0IBLR	1
1896	0920	15		L	56.600	23.700	5.0	EEP		3.5LEEP	3.5IDNS	5.0IBLR1
1907	0122	02		L	56.900	24.070	7.0	EEP		3.5LEEP	5.0IBLR	3.5 BLR1
1908	1228	05		L	54.600	25.800	9.0	BLR		4.5LEEP	7.0IBLR	4.5 BLR1

1908	1229	01	L	56.800	26.300	10.0	EEP	4.5L	EEP	7.0IBLR	4.5	BLR1					
1908	1229	0330	L	56.940	24.070	10.0	BLR	3.5L	BLR	5.5IBLR		1					
1908	1229	22	L	55.800	26.700	11.0	EEP	4.5L	EEP	6.5IBLR	4.5	BLR1					
1908	1229		L	57.500	25.700		BLR	3.5L	BLR	6.0IBLR		1					
1908	1230		L	54.308	22.300		POL	3.0L	BLR	4.0IPOL		1					
1909	0131	0715	L	56.900	24.100	6.0	EEP	3.5L	EEP	5.0IBLR	3.5	BLR1					
1909	0212	01	L	56.560	21.090		BLR	3.5L	BLR	3.0IBLR		1					
1909	0602	0830	L	58.400	25.600	7.0	BLR	1.8L	BLR	1.8	DNS	3.0IBLR1					
1910	0521	03	L	56.950	24.050	10.0	EEP	4.0L	EEP	4.0	BLR	6.0IBLR1					
1912	0615		L	59.700	25.000	6.0	BLR	2.0L	BLR	2.0	DNS	3.5IBLR1					
1931	0712	22	L	59.400	25.300	5.0	BLR	3.0L	BLR	4.5IBLR		1					
1932	0210		L	52.600	20.030		POL	4.3L	BLR	6.0IPOL		1					
1972	0904	0026	33.0	L	57.100	18.400		WAH	2.4L	WAH		1					
1976	1025	0839	45.0	L	59.260	23.390	10.0	EEP	4.7L	EEP	6.5IBLR	1					
1978	0510	0905		L	52.800	27.700	10.0	EEP	3.5L	EEP	3.5	BLR 4.5IBLR1					
1979	0724	1602	46.4	L	55.450	19.700		HEL	2.7L	HEL		1					
1980	0109	0124	52.4	L	58.910	22.990		HEL	2.4L	HEL		1					
1981	0622	1927	37.7	L	59.450	22.660	7.0	HEL	2.6L	HEL		1					
1982	0602	0758	17.7	L	57.040	21.940		HEL	2.3L	HEL		1					
1983	1201	2226	34.0	L	52.950	27.810	7.0	BLR	2.8L	BLR	4.5IBLR	1					
1985	1017	0132	24.0	L	52.900	28.400	7.0	EEP	3.5L	EEP	4.0IBLR	3.4	BLR1				
1987	0408	2302	22.0	L	58.400	26.100	14.0	BLR	3.5L	BLR	3.5	DNS 5.0IBLR1					
1987	0705	0242	11.7	L	58.300	26.000	8.0	BLR	2.9L	BLR	3.5IBLR	1					
1987	0922	1825		L	58.700	26.400	9.0	BLR	3.0L	BLR	4.5IBLR	1					
1988	0429	1536	52.0	L	56.970	19.530	1.0	BER	3.5L	HEL	3.3CB	BER	1				
1988	0429	1541	22.7	L	56.320	21.400	7.0	BER	3.3L	HEL	3.2CB	BER	3.1LBER1				
1988	0902	1917		L	58.800	26.400	7.0	BLR	2.9L	BLR	5.0IBLR	1					
1994	0312	0756	58.6	L	55.200	17.910	0.0	BER	2.7L	HEL	2.4L	BER	1				
1994	0601	1640	30.0	L	53.750	22.790		NAO	4.0L	BLR	5.5IPOL	2.3L	NAO1				
1995	0306	1024	24.3	L	55.040	30.820	18.0	BER	2.5L	HEL	2.2L	BER	1				
2002	1218	2114	21.9	L	55.888	18.203	2.2	BER	17	0.5	3.5L	HEL	4.2L	BUSG	3.5L	BER1	
2003	0112	1143	47.8	L	59.402	23.415	10.0	F	HEL	8	1.0	1.2L	HEL	1			
2004	0128	1540	00.2	L	58.792	23.851	10.0	F	HEL	9	0.9	1.6L	HEL	1			
2004	0921	1332	31.9	L	54.834	20.025	10.0	F	HEL	71	0.8	5.2L	WGRE	4.7L	WHRV	5.2L	LUPP1
2006	1106	0111	40.3	L	59.677	24.857	2.7	HEL	5	0.1	1.1L	HEL	1				

Išanalizavus ir palyginus rastus tektoninius Rytinės Baltijos žemėlapius, sudarytus skirtingų autorių pvz., (Аронова, 2007), 3.1.2 pav.; Aizberg et al. (1999), 3.1.3 pav.; Stirpeika (1999), Grigelis (1981), 3.1.4 pav.; Сувейздис (1979), padaryta išvada, kad skirtingi autoriai pateikia gana skirtingus žemėlapius ir vieno visuotiniai priimto šio regiono tektoninio žemėlapiu kol kas nėra. Skirtingi autoriai vaizduoja skirtingus lūžius, skirtingus lūžių rangus bei jų ilgius ir tuos pačius lūžius kiek kitose vietose. Pavyzdžiui, pagal Аронова (2007), per Ignalinos AE aikštelės teritoriją ar greta jos eina pietvakarių–šiaurės–rytų (PV–ŠR) regioninis lūžis (3.1.2 pav.), pagal Aizberg et al. (1999), iki šios vietos prieina ir baigiasi tokios pat krypties superregioninis lūžis (3.1.3 pav.), o pagal Tarybų Baltijos respublikų tektoninį žemėlapi (Grigelis, 1981) tą pačia vietą kerta vakarų–rytų (R–V) krypties lūžis (3.1.4 pav.).



3.1.1 pav. Žemės drebėjimai Rytų Baltijos regione. Apskritimai vaizduoja istorinius įvykius (iki 1964 m.), šešiakampiai – instrumentiškai registruoti įvykiai (nuo 1964 m. iki 2009 m.). Žemėlapis sudarytas naudojant pilną („neišvalytą“) Rytų Baltijos seisminių įvykių katalogą (3.1.1 lentelė).

Didžiąją dalį Rytų Baltijos seisminių įvykių katalogo sudaro istoriniai įvykiai. Nei vienas šaltinis, kuriais remiantis ir buvo sudarytas šis katalogas, nenurodo istorinių įvykių epicentrų lokalizavimo paklaidų, tačiau galima spėti, kad epicentrų koordinatės galėtų turėti dešimties ar kelių dešimčių km paklaidas. Vieno 2002 m. gruodžio 18 d. 21h 14 min (UTC) Baltijos jūroje instrumentiškai užregistruoto žemės drebėjimo epicentras nustatytas daugiau nei su 40 km

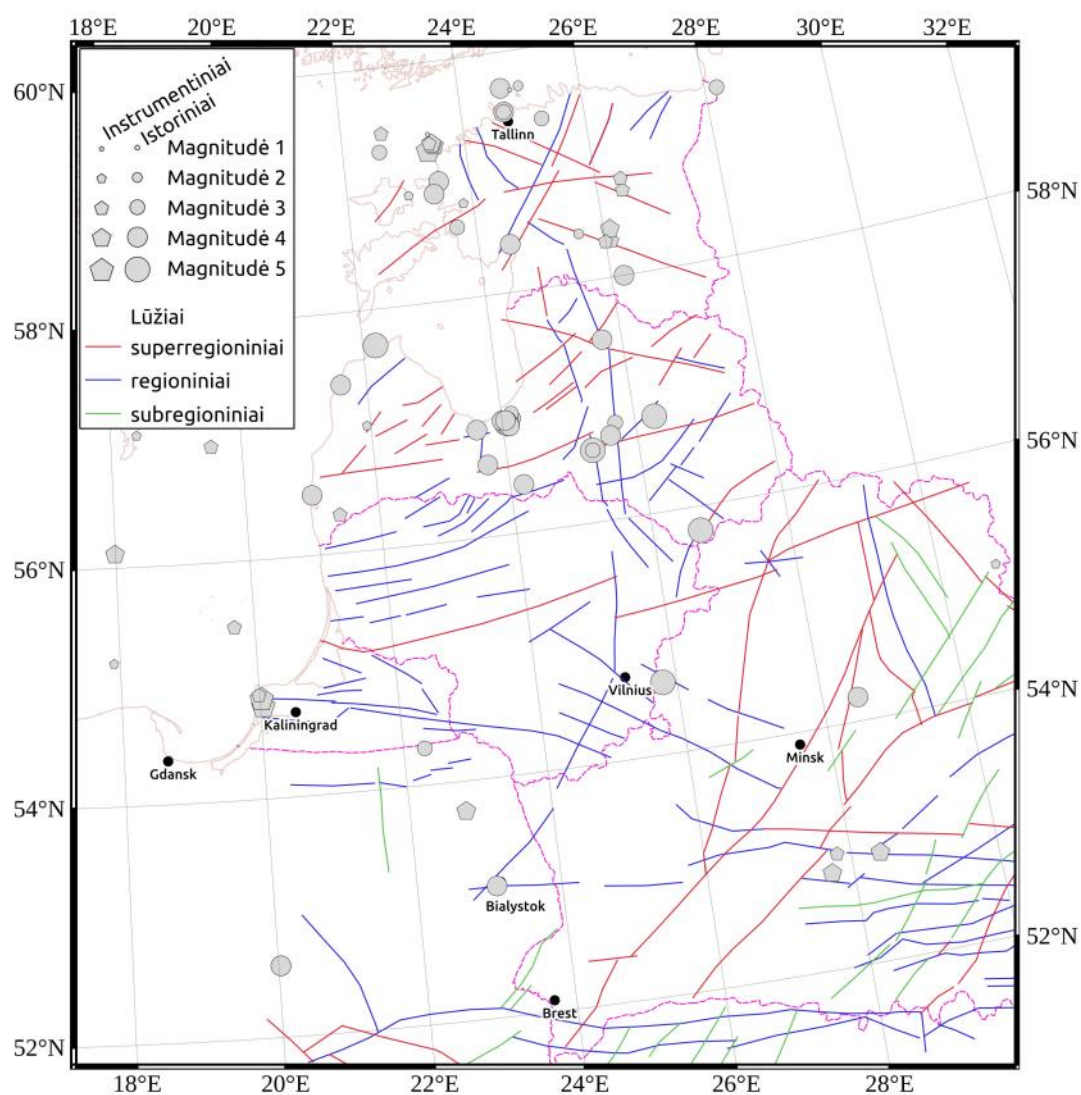
paklaida (A. Pačesa, 2003, nepublikuota ataskaita, LGT fondai, Nr. 6088). Apie dešimt skirtingų nacionalinių ir tarptautinių seismologinių centrų ir atskirų tyrėjų dviejų stipriausių 2004 m. Kaliningrado drebėjimų epicentrus lokalizavo skirtingose Sambijos pusiasalio ir priekrantės vietose, epicentrai buvo išsibarstę maždaug 30 km diametro apskritimo plote (Gregersen et al., 2007).

Atsižvelgiant į aukščiau išdėstytus faktus, jog kol kas nėra sutarta dėl vieningo Rytų Baltijos regiono tektoninio žemėlapiu ir kad seisminių įvykių lokalizacijos paklaidos yra gana didelės, atskirų seisminių įvykių negalima vienareikšmiškai susieti su atskirais lūžiais ar lūžių zonomis.

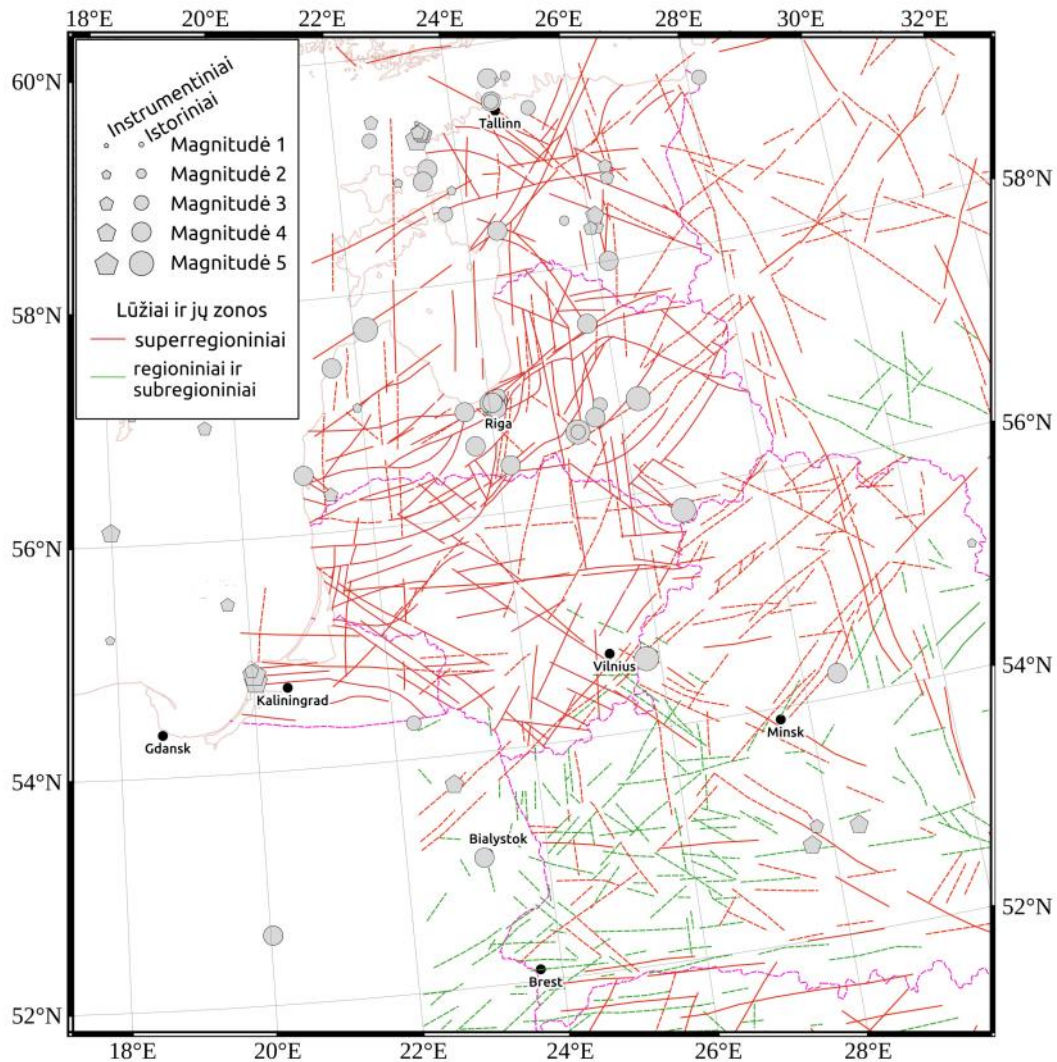
Analizuojant seisminių įvykių pasiskirstymą Rytų Baltijos regione, galima stebėti, kad šiaurinė regiono dalis pasižymi didesniu seisminiu aktyvumu nei pietinė (pvz. 3.1.2 pav.). Skiriamoji riba tarp šių dviejų sričių eina maždaug šiauriniu Lietuvos pasieniu iš vakarų į rytus, o ties Rokiškio keičia kryptį ŠR link ir, išilgai tokios pat krypties lūžių, pažymėtų daugelyje tektoninių žemėlapių, nueina į Latvijos teritoriją. Panaši riba buvo pravesta ir ankstesniuose Pasaulio (Giardini et al., 1999) ir Europos (Giardini et al., 2003) seisminio pavojingumo žemėlapiuose, kai Rytinė Baltijos teritorija buvo padalinta į pietinę ir šiaurinę provincijas.

Nors skirtingų autorių Rytų Baltijos tektoniniai žemėlapiai vaizduoja gana skirtingus lūžius ar lūžių zonas, apibendrinant galima išvelgti ir tam tikrų vyraujančių lūžių krypčių ar jų tankio netolygumus atskirose regiono srityse. Latvijos vakarinėje dalyje ir šiaurės–vakarinėje (ŠV) Lietuvos dalyje vyrauja V–R krypčių lūžiai, kurių orientacija, einant į rytus palaipsniui keičiasi šiaurės–rytų (Š–R) kryptimi, o rytinėje Latvijos dalyje vyrauja PV–ŠR krypčių lūžiai. Paminėtina, kad ši lūžių zona yra kiek tankesnė, nei kitose nagrinėjamo regiono srityse. Šiaurinėje Latvijos dalyje stebimas gana ryškus ŠV–pietryčių (ŠV–PR) krypties lūžis, už kurio, einat toliau į šiaurę, lūžių tinklas kiek išretėja ir keičiasi jų kryptys. Estijos teritorijoje ryškesni PV–ŠR, ŠV–PR ir ilguminės krypties lūžiai.

Lietuvos teritorijoje lūžių tinklo tankis yra gan retas. Vakarų Lietuvoje vyrauja platuminės krypties lūžiai, kurių kryptis, einant į rytus, sukasi šiaurės link. Pietvakarių Lietuvoje ir Kaliningrade išryškėja ŠV–PR krypties lūžiai. Vidurio Lietuvoje pastebimi ilguminės krypties su ŠR krypties dedamąją lūžiai. Už rytinės Lietuvos sienos, Baltarusijos teritorijoje aiškiau atsekamos PV–ŠR krypties lūžių zonos. Rytinės Baltijos regioną nuo teritorijų, esančių toliau rytuose, gana aiškiai atiboja lūžių zona, prasidedanti ties Narva Estijoje ir einanti į P–PR maždaug iki Mogiliovo (pvz. 3.1.3 ir 3.1.2 pav.)



3.1.2 pav. Rytų Europos vakarinės dalies pagrindiniai tektoniniai lūžiai pagal Аронова (2007) ir Jungtinio Rytų Baltijos seisminio katalogo seisminiai įvykiai.

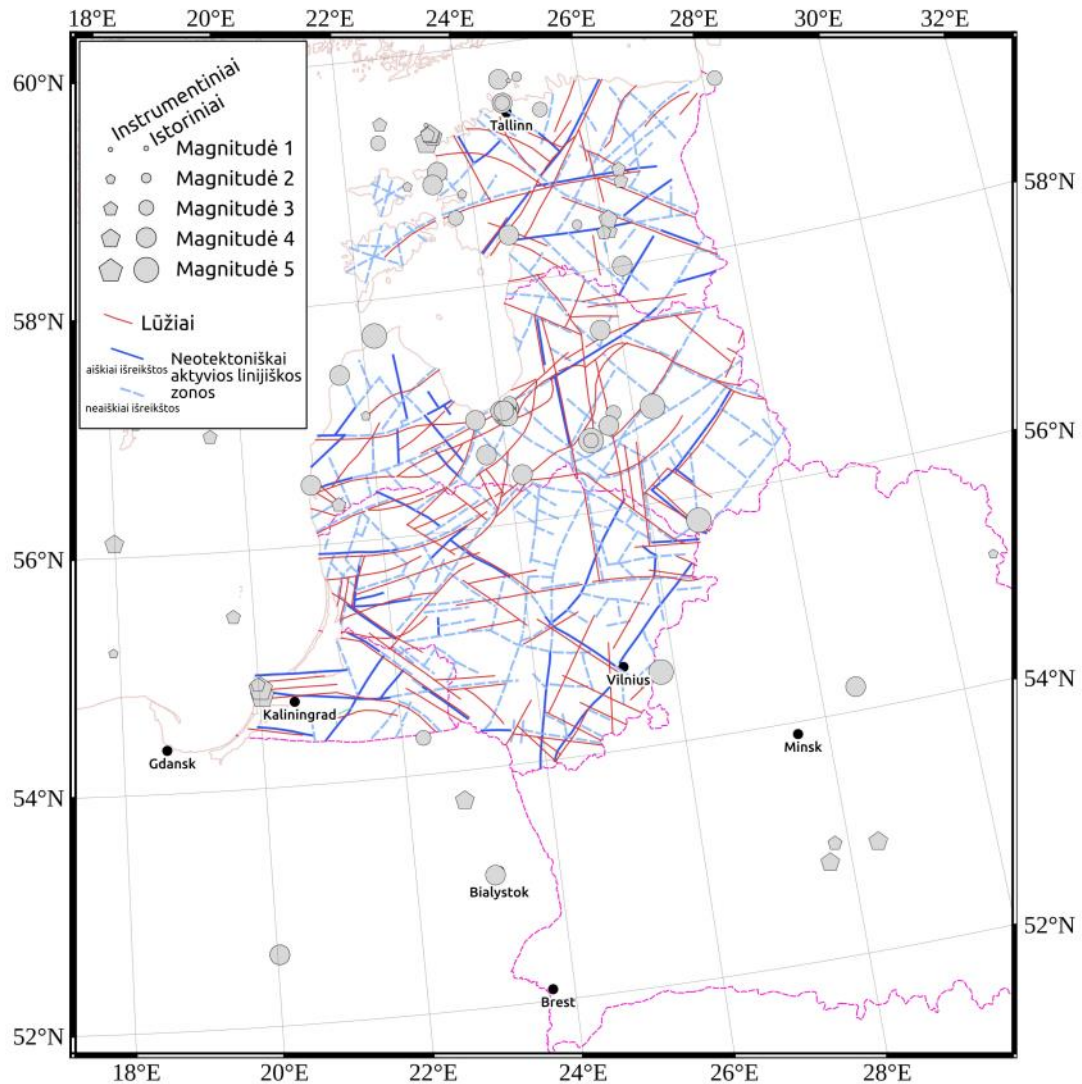


3.1.3 pav. Baltarusijos ir Baltijos šalių seismotektoninis žemėlapis pagal Aizberg et al. (1999) ir Jungtinio Rytų Baltijos seisminio katalogo seisminiai įvykiai. Ištisomis linijomis pavaizduoti naujai aktyvizavęsi seni lūžiai, punktyrinės linijos – naujai susiformavę lūžiai.

Anksčiau sudaryti Rytų Baltijos regiono seismotektoniniai modeliai

Keletas neseniai atliktų tyrimų pasiūlė ne vieną variantą kaip suskirstyti Europą, įskaitant ir Rytų Baltijos regioną, į SZ. Šie modeliai pirmiausia pagrįsti SZ vietomis su išsklaidytu (difuziniu) seisingumu. Atskiri modeliai rodo skirtingas vietinio ir regioninio seisingumo, seismotektoninės situacijos

ir struktūrinės geologijos interpretacijos. Šie seismogeniniai zonavimai pateikti žemiau esančiuose aprašymuose.



3.1.4 pav. Tarybinių Baltijos respublikų kristalinio pamato tektonikos ir neotektoniškai aktyvių zonų palyginimas pagal Grigelis (1981) ir Jungtinio Rytų Baltijos seisminio katalogo seisminiai įvykiai.

Pasaulinė seisminio pavojaus vertinimo programa (Global Seismic Hazard Assessment Program, GSHAP) (Giardini et al., 1999) buvo gairė seisminiam pavojui vertinti. Tyrimų metu buvo sudarytas specialus seismotektoninio zonavimo vertinimas Regione Nr. 3, kuris apėmė vakarinę, centrinę, Šiaurinę ir

Šiaurės-Vakarų Europą (Grünthal et al., 1999). Pastarasis modelis, apimantis nacionaliniais mastais atliktus pavojaus vertinimus, buvo sudarytas iš 196 seisminių zonų (3.1.5 pav.). Rytų Baltijos regionas buvo padalintas į šiaurinę ir pietinę provincijas.

Vykdamas Europos-Viduržemio jūros ESC-SESAME seisminio pavojaus vertinimo projektą visa Europa buvo suskirstyta į 463 SZ (Jiménez et al., 2003). Šaltinių regionai buvo sudaryti naudojant GSHAP ir papildyti kitų publikacijų informacija, siekiant išvengti tuščių vietų žemėlapyje. Pirminiai modeliai buvo pašalinti ir zonos ties persidengiančiomis ribomis buvo iš naujo apibrėžtos. Rytų Baltijos SZ išliko tokios pačios kaip ir GSHAP tyrime.

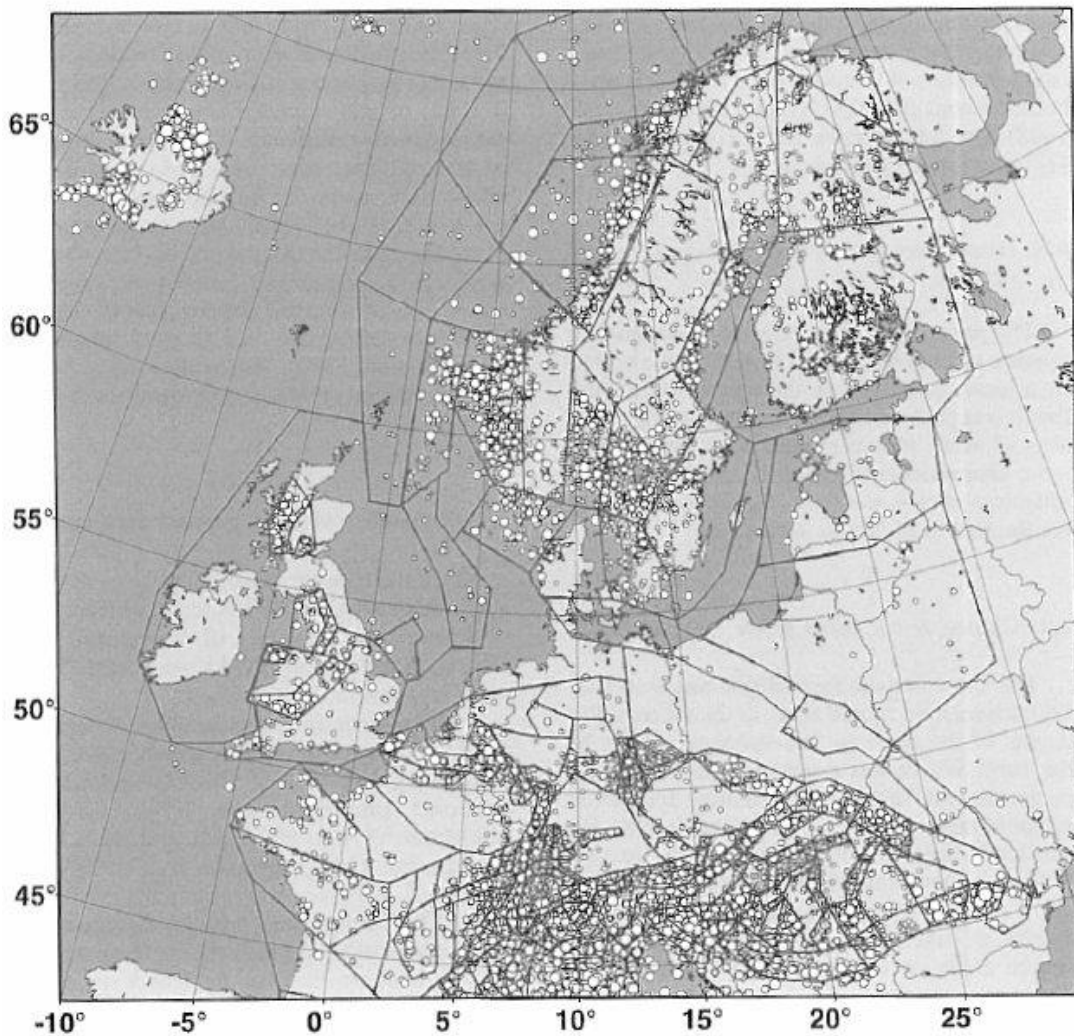
Wahlström ir Grünthal (2000) išplėtojo SZ modelius tikimybiniam seisminiam pavojui vertinti Švedijoje, Suomijoje ir Danijoje. Vertinimas įskaitė tris alternatyvius seismogeninius zonavimus. Tie patys modeliai po to buvo naudojami pavojui vertinti visoje Fenskanijoje (Wahlström and Grünthal, 2001). Jų naudoti seismogeniniai modeliai pavaizduoti 3.1.6 pav. ir jie apima:

- peržiūrėtą NFR/NORSAR ir NGI (1998) modelį, kuris buvo naudojamas GSHAP, įskaitant 31 SZ (3.1.6 A pav.);
- modelį, pagrįstą seismingumo pasiskirstymu, su 21 SZ (3.1.6 B pav.);
- modelį, pagrįstą Švedijos, Suomijos ir Danijos tektoniniais žemėlapiais, su 14 SZ bei 21 regionu Norvegijai ir Norvegijai priklausančiai jūros daliai pagal peržiūrėtus NFR/NORSAR ir NGI modelius (3.1.6 C pav.).

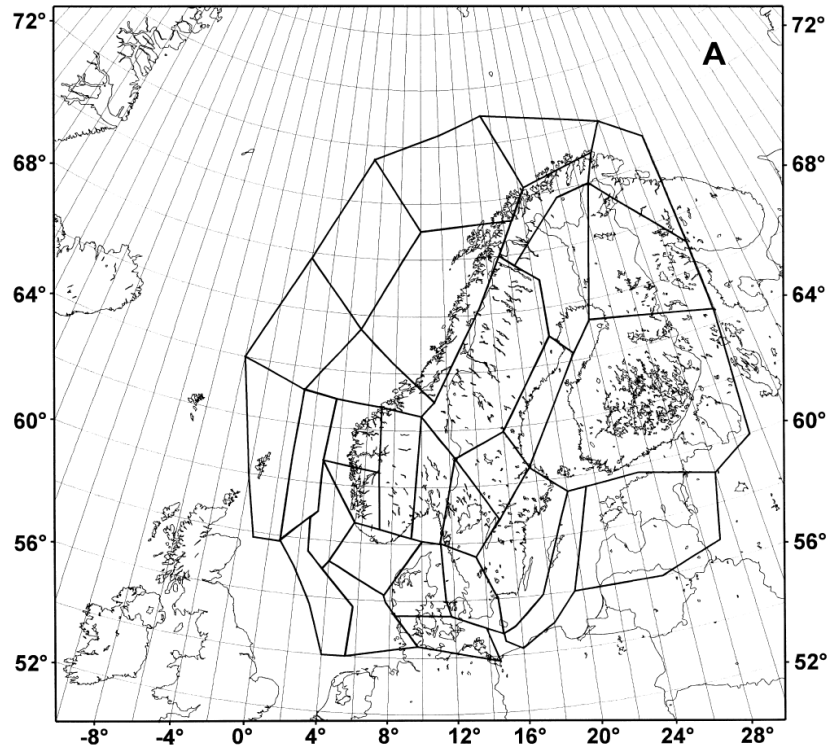
Dar vienas seismogeninis zonavimas, sudarytas iš 6 regionų (3.1.7 pav.), buvo pasiūlytas Varpasuo ir kt. (2001) siekiant nustatyti seisminį pavojingumą Leningrado AE aikštelėje naudojant TSPV metodą. Šis modelis apima centrinę ir šiaurinę Baltijos jūros dalį, Lietuvą, Latviją, Estiją, pietinę Suomiją ir šiaurinę Švediją. Pastarasis modelis išsiskiria tuo, kad yra išskirtos šešios pilnai ar dalinai viena nuo kitos atskirtos SZ, o likusi erdvė atvaizduota kaip visiškai aseismiška, kas prieštarauja dabar jau visuotinai įsigalėjusiai nuostatai, kad

visiškai aseismiškų sričių seisminio pavojingumo vertinimuose turėtų nebūti (pvz. Chen and Scawthorn, 2003).

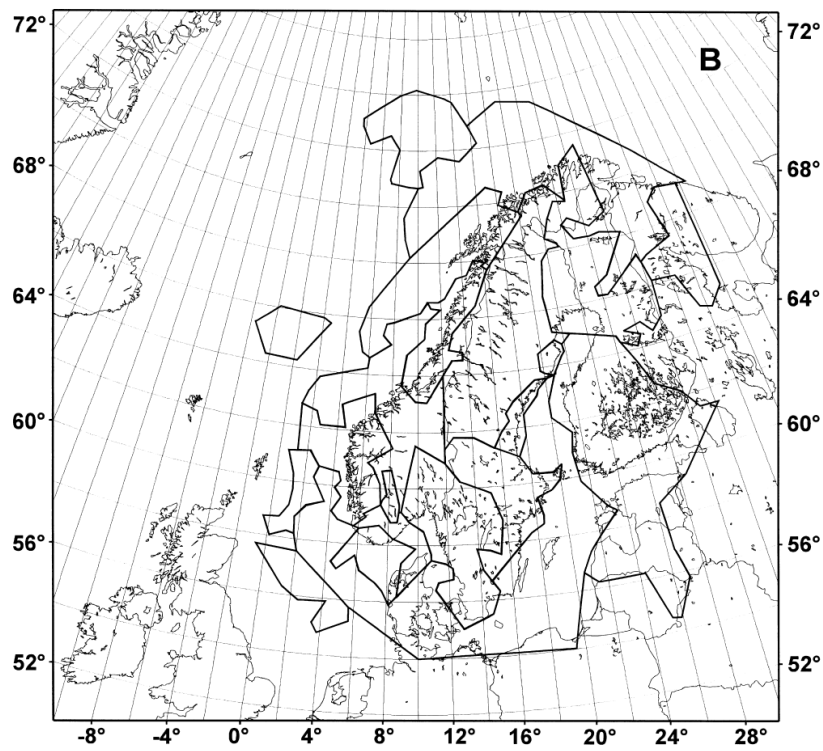
Apibendrinant pateiktus seisminio zonavimo pavyzdžius galima teigti, kad griežtų taisyklių sudarant tam tikro regiono SZ modelius nėra. Skirtingi autoriai gana laisvai interpretuoja turimus seisminius, tektoninius, geologinius ir kitus duomenis sudarydami savo tyrimuose naudojamus seismogeninius modelius.



3.1.5 pav. GSHAP SZ modelis Regionui Nr. 3 (Grünthal et al., 1999).

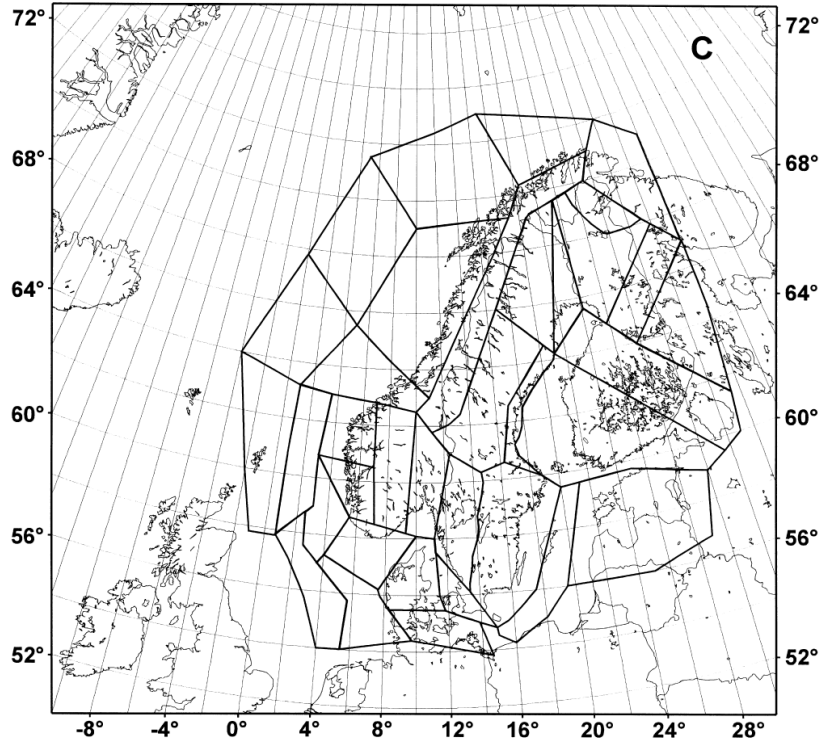


A. Peržiūrėtas NFR/NORSAR ir NGI (1998) modelis.



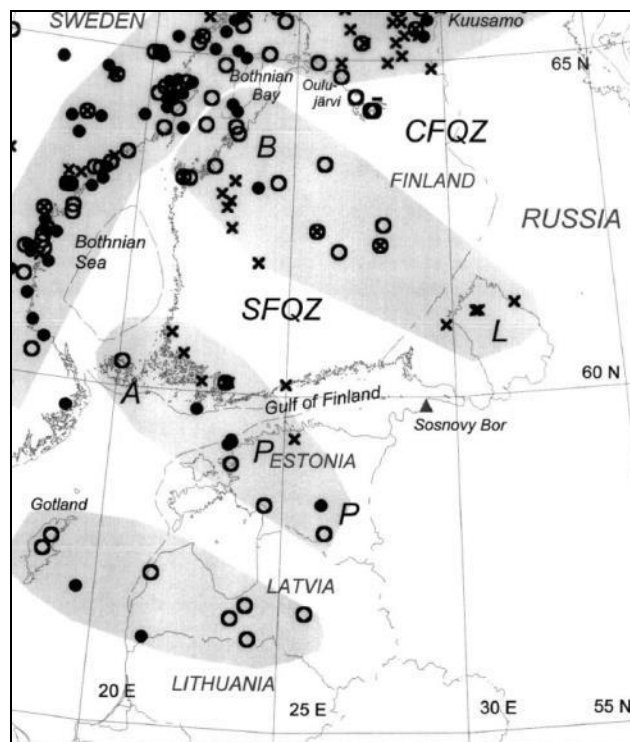
B. Modelis pagrįstas seismingumo pasiskirstymu.

3.1.6 pav. Skirtingi Fenoskandijos seismogeniniai zonavimai pagal Wahlström and Grünthal (2000, 2001).



C. Modelis pagrįstas tektoniniais žemėlapiais ir modifikuotu NFR/NORSAR ir NGI (1998) modeliu.

3.1.6 pav. tęsinys. Skirtingi Fenoskandijos seismogeniniai zonavimai pagal Wahlström and Grünthal (2000, 2001).



3.1.7 pav. Rytų Baltijos ir rytinės Fenoskandijos dalies SZ modelis pagal Varpasuo et al., 2001.

Rytų Baltijos regiono seismotektoniniai modeliai

Apibendrinant analizuotus Rytų Baltijos regiono tektoninis žemėlapius, sudarytus skirtingų autorių, galima konstatuoti, kad kol kas nėra vieno visuotinai suderinto tektoninio žemėlapiu. Todėl atsižvelgiant į egzistuojančius tektoninių lūžių tinklo neapibrėžtumus skirtingų autorių tektoniniuose žemėlapiuose ir seisminio aktyvumo pasiskirstymą buvo sukonstruoti trys alternatyvūs tiriamo regiono seismotektoniniai modeliai.

Rytų Baltijos regiono seismotektoninis modelis A

Pirmas modelis A (3.1.8 pav.) yra panašus į GSHAP (3.1.5 pav.) ir ESC-SESAME projektuose naudotus modelius su keliomis modifikacijomis. Pagrindiniai pakeitimai buvo šiaurinės Rytų Baltijos provincijos padalijimas į dvi zonas, turinčias truputį kitokius seismingumo intensyvumus ir atskirtas kažkiek seismiškai ramesne teritorija maždaug sutampančia su Latvijos ir Estijos valstybine siena. Seisminių zonų ribos buvo pakoreguotos remiantis aukštesnio rango regioniniais lūžiais.

Rytų Baltijos pietinė SZ (zona A1)

Gana didelė zona apimanti pietinę Rytų Baltijos regiono, šiaurės-vakarų Baltarusijos ir šiaurės-rytų Lenkijos dalis. Skirtingi tyrėjai nurodė skirtingos orientacijos lūžių zonas: PR–ŠV ir PV–ŠR (Aizberg et al., 1999 ir Grigelis, 1981), R–V (Аронова, 2007). Ši zona yra mažiau seismiškai aktyvi, lyginant su zonomis A2 ir A3. Žemės drebėjimai yra išsklaidyti, reti ir sunkiai susiejami su kokiais nors lūžiais; kita vertus, šioje zonoje vykstantys žemės drebėjimai gali būti stiprūs, pvz., Daugpilio žemės drebėjimas ($M = 4,6$) 1908 m. ir Kaliningrado žemės drebėjimai ($M_w = 5,0$, $M_w = 5,2$) 2004 m.

Rytų Baltijos centrinė SZ (zona A2)

Ši zona siejama su gana tankiu lūžių tinklu, daugelis kurių vakarinėje dalyje orientuoti V–R kryptimis, o einant į rytus jie „sukasi“ į šiaurę ir tampa PV–ŠR krypties lūžiais. Skirtingi tektoninių žemėlapių autoriai lūžius šioje

zonoje vaizduoja gana panašiai (3.1.2, 3.1.3 ir 3.1.4 pav.). Zonos seisminis aktyvumas yra didžiausias visoje Rytų Baltijos teritorijoje. Seisminių įvykių magnitudės šiame regione siekė $M = 4,1$ 1616 m., $M = 4,5$ 1875 m. ir $M = 4,5$ 1908 m.

Rytų Baltijos šiaurinė SZ (zona A3)

Ši zona siejama su lūžių tinklu, kurių daugelis orientuoti PV–ŠR ir PR–ŠV kryptimis (Aizberg et al., 1999 ir Аронова, 2007), Grigelis (1981; 3.1.4 pav.) dar išskiria ir keletą platuminės krypties lūžių. Šioje zonoje Osmussaarės saloje 1976 m. užfiksuotas vienas iš stipriausių Rytų Baltijos regiono seisminių įvykių, kurio magnitudė vertinta $M = 4,7$.

Rytų Baltijos regiono seismotektoninis modelis B

Antrasis seismotektoninis modelis buvo sudarytas pagal seisminių įvykių klasterius ir siejamas su atskirais lūžiais bei lūžių zonomis. Buvo išskirtos septynios SZ, turinčios išsklaidytą (difuzinį) seismingumą (3.1.9 pav.).

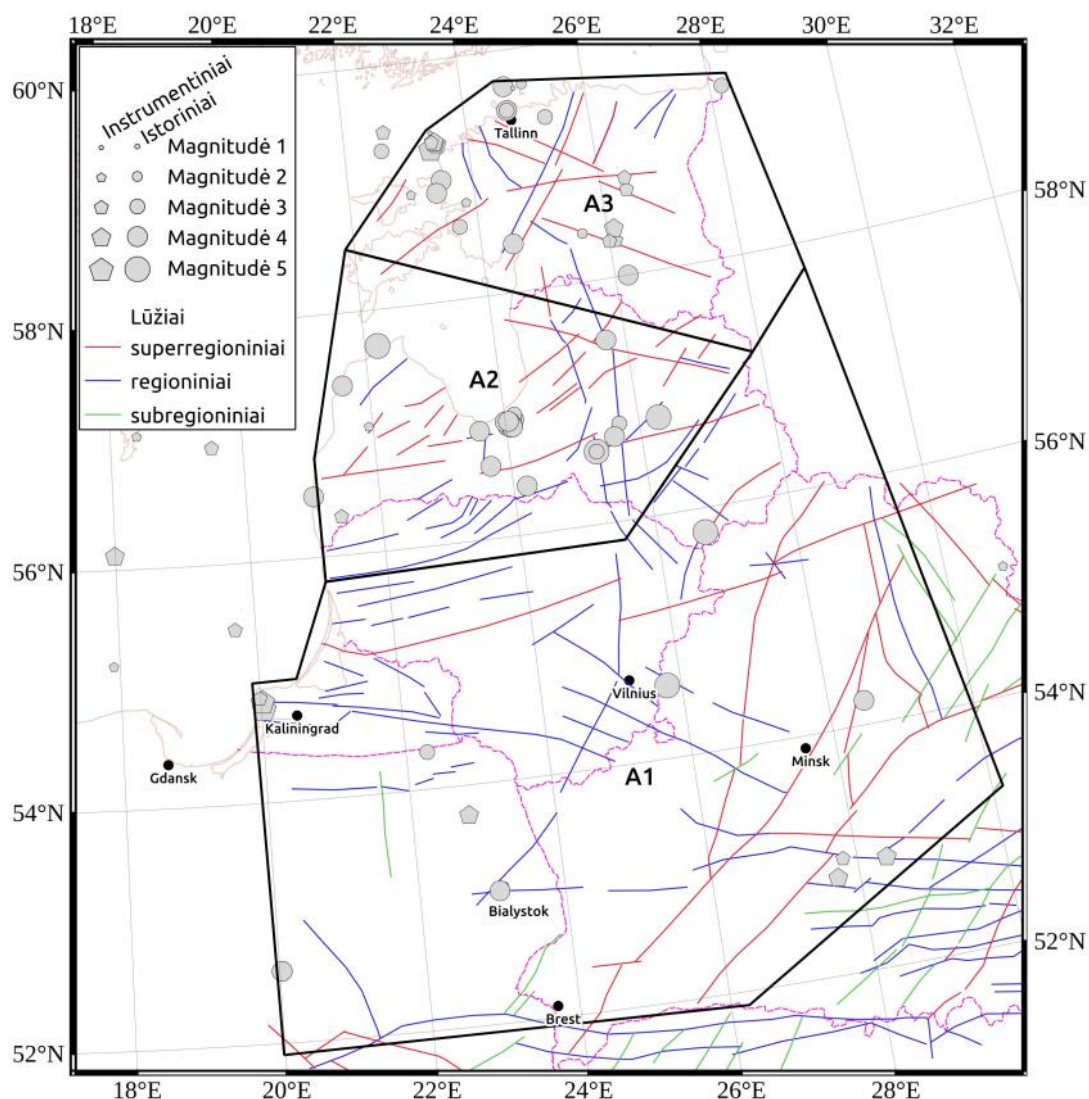
Rytų Baltijos foninė SZ (zona B0)

Ši zona apima visą tiriamą regioną, o taip pat ir šiaurės-vakarinę Baltarusijos bei šiaurės-rytinę Lenkijos dalis. B0 zona įskaičiuoja seisminį potencialą, kurį sukuria žemės drebėjimai nepatenkantys į kitas B grupės zonas ir užpildo erdvę tarp šių zonų. Dėl mažo seisminių įvykių kiekio ir didelio šios zonos ploto zona B0 gana silpnai įtakos viso tiriamo regiono seisminį pavojingumą (3.2.1 lentelė).

Kaliningrado SZ (zona B1)

Kaliningrado SZ yra siejama su viena didele tektonine zona, kurios egzistavimas pagrįstas gręžimo ir seisminio zondavimo tyrimais. Lūžių amplitudės nėra didelės, jos retai kada siekia 50 metrų, tačiau lūžiai tęsiasi 350–400 km V–R kryptimi nuo Lebos lūžių zonos, esančios Lenkijos šelfe, iki Lietuvos-Kaliningrado sienos (Šliaupa and Hoth, 2011). Didžiausi naftos telkiniai Kaliningrado srityje priklauso šiai zonai. Vakarinėje dalyje zona apribota Š–P krypties Baltijos jūros kranto, šiaurinėje dalyje – platuminės

krypties lūžių (Aizberg et al., 1999 ir Grigelis, 1981), pietinėje dalyje – platuminės krypties lūžio (Аронова, 2007), rytinėje dalyje – ŠV–PR krypties lūžių (Grigelis, 1981). Šioje zonoje 2004 m. Kaliningrado srityje užfiksuoti stipriausi Rytų Baltijos regiono žemės drebėjimai $M_W = 5,0$ ir $M_W = 5,2$



3.1.8 pav. Rytų Baltijos seismotektoninis modelis A. Pagrindui panaudotas tektoninių lūžių žemėlapis pagal Аронова (2007).

Pietrytinė Rytų Baltijos SZ (zona B2)

Ši zona gerai išsiskiria kristalinio pamato uolienose, bet čia nėra gerai išreikštų lūžių nuosėdinėje dangoje. Vakarinė ir rytinė šios zonos ribos sietinos su PV–ŠR lūžiais (Aizberg et al., 1999 ir Grigelis, 1981), o šiaurinė ir pietinė

ribos sietinos su ŠV–PR lūžiais (Grigelis, 1981 ir Аронова, 2007). Šioje zonoje 1908 m. yra užfiksuoti du $M = 4,5$ magnitudžių žemės drebėjimai Daugpilyje (Latvija) ir kaime Bystrica (Baltarusija).

Latvijos SZ (zona B3)

Ši zona apima centrinę Latvijos teritoriją. Žemės pluta šioje zonoje yra labiausiai pažeista visame Rytų Baltijos regione (Brangulis ir Kanevs, 2002). Dauguma lūžių susiformavo Kaledoniniu laikotarpiu (prieš 425–410 mln. m.) ir buvo reaktyvuoti Hercininiu periodu (prieš 340–290 mln. m.). Kai kurių lūžių amplitudės siekia 600 m (Brangulis and Kanevs, 2002). B3 zona didžiąja dalimi sutampa su jau minėta zona A2. Vakarinė zonos riba sutampa su iš šiaurės į pietus besitęsiančia Baltijos pakrante, pietinė riba sutampa su platuminės krypties lūžiais, kurie einat į rytus „sukasi“ ŠR kryptimi (Aizberg et al., 1999; Grigelis, 1981). Šiaurės rytinė B3 zonos riba sutampa su ŠV–PR krypties lūžiais (Grigelis, 1981), o šiaurinė zonos riba kerta Rygos įlanką Baltijos jūroje. Stipriausi žemės drebėjimai ($M = 4,5$) šioje zonoje vyko 1857 m. Kuršžemės šiauriniame iškyšulyje (Latvija) ir 1908 m. netoli Madonos miesto (Latvija).

Vakarų Estijos SZ (zona B4)

Nuosekliau nagrinėtų visų trijų autorių tektoniniai žemėlapiai šioje zonoje vaizduoja keletą ŠV–PR ir PV–ŠR krypčių lūžių (Аронова, 2007; Aizberg et al., 1999 ir Grigelis, 1981). Kita vertus, galima pastebėti, kad beveik visi šios zonos žemės drebėjimai yra išsidėstę palei Baltijos jūros pakrantę ir tai rodo, kad čia turėtų egzistuoti atitinkamų krypčių seismiškai aktyvūs tektoniniai lūžiai. B4 zona šiaurėje, vakaruose ir pietvakariuose yra apribota Baltijos jūros pakrante, jos pietrytinė riba sutampa su PV–ŠR krypties lūžiu (Аронова, 2007; Aizberg et al., 1999 ir Grigelis, 1981). Osmussaarės žemės drebėjimo, vykusio šioje zonoje, magnitudė buvo $M = 4,7$.

Šiaurės rytų SZ (zona B5)

Ši zona kristalinio pamato žemėlapyje puikiai matoma, tačiau nuosėdinėje dangoje nėra išskiriama jokių lūžių. Čia nelabai stiprūs drebėjimai (iki $M = 3,5$) yra gana kompaktiškai susitelkę Š-P krypties pailgoje zonoje.

Pagal Aizberg et al. (1999) žemėlapi čia praeina tokios pat (Š–P) krypties nedidelių lūžių zona, tačiau Аронова (2007) vaizduoja tik du ŠV–PR krypties lūžius, o Grigelis (1981) vaizduoja ŠV–PR, PV–ŠR ir platuminės krypties lūžius.

Pietinė Baltarusijos SZ (zona B6)

Ši nedidelė zona išsidėsčiusi pietinėje Baltarusijos dalyje. Joje vyko žemės drebėjimų, kurių magnitudės neviršijo $M = 3,5$. Аронова (2007) šioje vietoje vaizduoja kelis platuminės krypties lūžius, o Aizberg et al. (1999) vaizduoja platuminės ir ŠV–PR krypties lūžių zonas.

Rytų Baltijos regiono seismotektoninis modelis C

Trečiasis seismotektoninis modelis C kaip ir antrasis (B) buvo sudarytas pagal seisminių įvykių klasterius (spiečius) ir siejamas su atskirais lūžiais bei lūžių zonomis. Tačiau skirtingai nuo modelio B, seisminių įvykių klasteriai buvo organizuojami kiek kitaip. Esminis skirtumas buvo tai, kad žemės drebėjimai lokalizuoti Baltijos jūros pakrantės ruože buvo apjungti į vieną SZ. Būtent tokios zonos išskyrimą pasiūlė Lietuvos, Latvijos ir Rusijos atstovai, kai 2009 m. Osle buvo organizuotas Europos seisminio pavojingumo vertinimo projekto SHARE darbinis susitikimas skirtas Baltijos jūros ir Baltijos šalių teritorijų seismogeniniam zonavimui. Taip pat, lyginant C modelį su modeliu B, buvo modifikuotos B1, B3 ir B5 zonos, B2 prijungta prie kitų zonų ir atsisakyta B6 zonos. Viso buvo išskirtos penkios SZ, turinčios išsklaidytą (difuzinį) seismingumą (3.1.10 pav.).

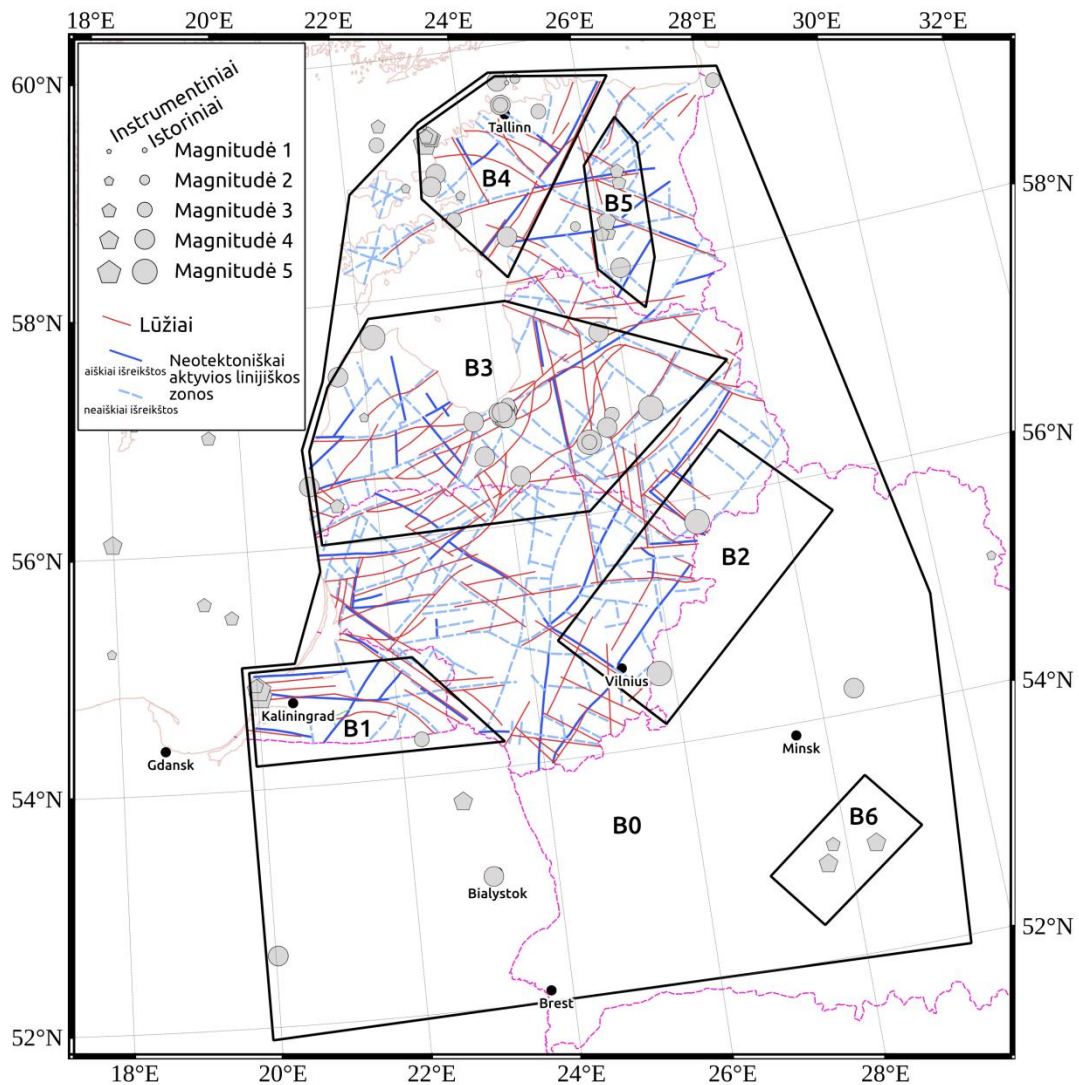
Rytų Baltijos foninė SZ (zona C0)

Ši zona apima visą tiriamą regioną, o taip pat ir šiaurės-vakarinę Baltarusijos bei šiaurės-rytinę Lenkijos dalis. Kaip ir B0, C0 zona įskaičiuoja seisminį potencialą, kurį sukuria žemės drebėjimai nepatenkantys į kitas C grupės zonas ir užpildo erdvę tarp šių zonų. Dėl mažo seisminių įvykių kiekio

ir didelio šios zonos ploto zona C0 gana silpnai įtakos viso tiriamo regiono seisminį pavojingumą (3.2.1 lentelė).

Pietinė SZ (zona C1)

Ši zona apima žemės drebėjimus, vykusius pietinėje Baltijos regiono dalyje, taip pat ir 2004 m. Kaliningrado drebėjimus ($M_W = 5,0$ ir $M_W = 5,2$). C1 siejama su platuminės krypties lūžiais ir jų zonomis pavaizduotomis Аронова (2007) ir Aizberg et al. (1999) tektoniniuose žemėlapiuose.



3.1.9 pav. Rytų Baltijos seismotektoninis modelis B. Pagrindui panaudotas tektoninių lūžių žemėlapis pagal Grigelį (1981).

Baltijos jūros pakrantės SZ (zona C2)

Gana daug žemės drebėjimų Rytų Baltijos regione yra išsidėstę Baltijos jūros priekrantėje. Zona šiaurėje prasideda ties šiauriniais Estijos krantais, tęsiasi palei vakarinį Latvijos krantą ir baigiasi vakarų Lietuvoje ties Telšių lūžiu. Skirtingi tektoninių žemėlapių autoriai vaizduoja gana skirtingus lūžius šioje zonoje, tačiau turimam epicentrų pasiskirstymui pagrįsti kol kas nėra nuoseklaus paaiškinimo, argumentuoto tektonine informacija.

Centrinės Latvijos SZ (zona C3)

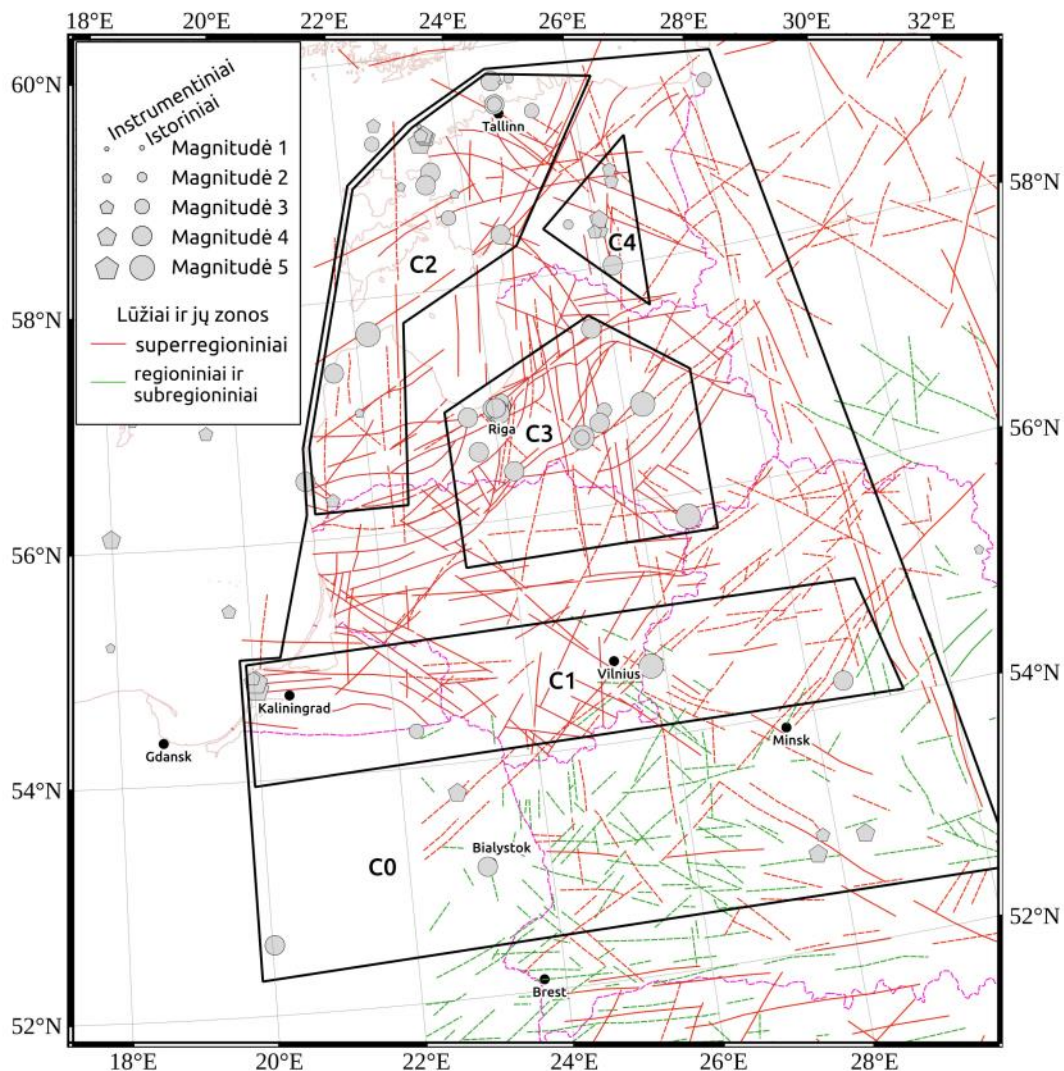
Ši zona – tai kažkiek sumažinta B3 zonos versija. Ji apima tik centrinę Latvijos dalį, o Baltijos jūros pakrantės yra prijungtos prie C1 zonos. Visi detaliau nagrinėtų tektoninių žemėlapių autoriai šioje zonoje vaizduoja PV–ŠR krypties lūžius, o Aizberg et al. (1999) ir Grigelis (1981) dar vaizduoja ir ŠV–PR krypties lūžius. Stipriausi žemės drebėjimai ($M = 4,5$) šioje zonoje vyko 1908 m. Daugpilyje ir netoli Madonos miesto (Latvija).

Centrinės Estijos SZ (zona C4)

Ši zona – tai zonos B5 modifikacija, ji apjungia beveik tuos pačius seisminius įvykius, tačiau yra išplėsta erdvėje. Jos rytinė riba siejama su Š–P krypties lūžiais (Aizberg et al., 1999), o šiaurės vakarinė ir pietrytinė ribos siejamos su PV–ŠR ir ŠV–PR krypčių lūžiais, kurie vaizduojami Аронова (2007) ir Grigelis (1981) tektoniniuose žemėlapiuose.

Vrančos regiono seismotektoninis modelis

Pirminis šio darbo tikslas buvo įvertinti Rytų Baltijos regiono seisminį pavojingumą. Tačiau kaip buvo minėta pirmajame skyriuje Rytų Baltijos regiono seisminį pavojingumą gana ženkliai įtakoja Vrančos (Rumunija) SZ. Todėl šiame darbe nebuvo detaliai nagrinėjama Vrančos SZ. Vrančos regiono SZ charakteristikos buvo paimitos iš kitų tyrėjų nuodugniai analizavusių šios zonos seismingumą publikacijų, o būtent iš Mantiniemi et al. (2003).



3.1.10 pav. Rytų Baltijos seismotektoninis modelis C. Pagrindui panaudotas tektoninių lūžių žemėlapis pagal Aizberg et al. (1999).

3.2. SEISMOGENINIŲ ZONŲ CHARAKTERISTIKOS

Seisminio katalogo pilnumas

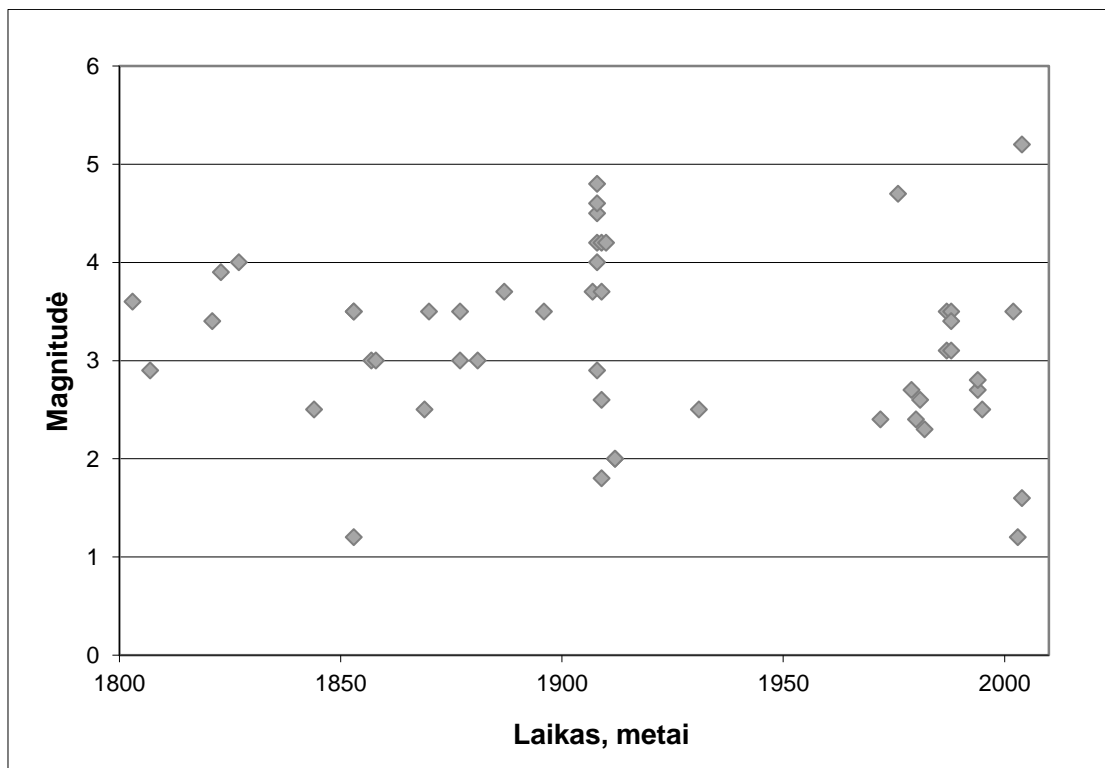
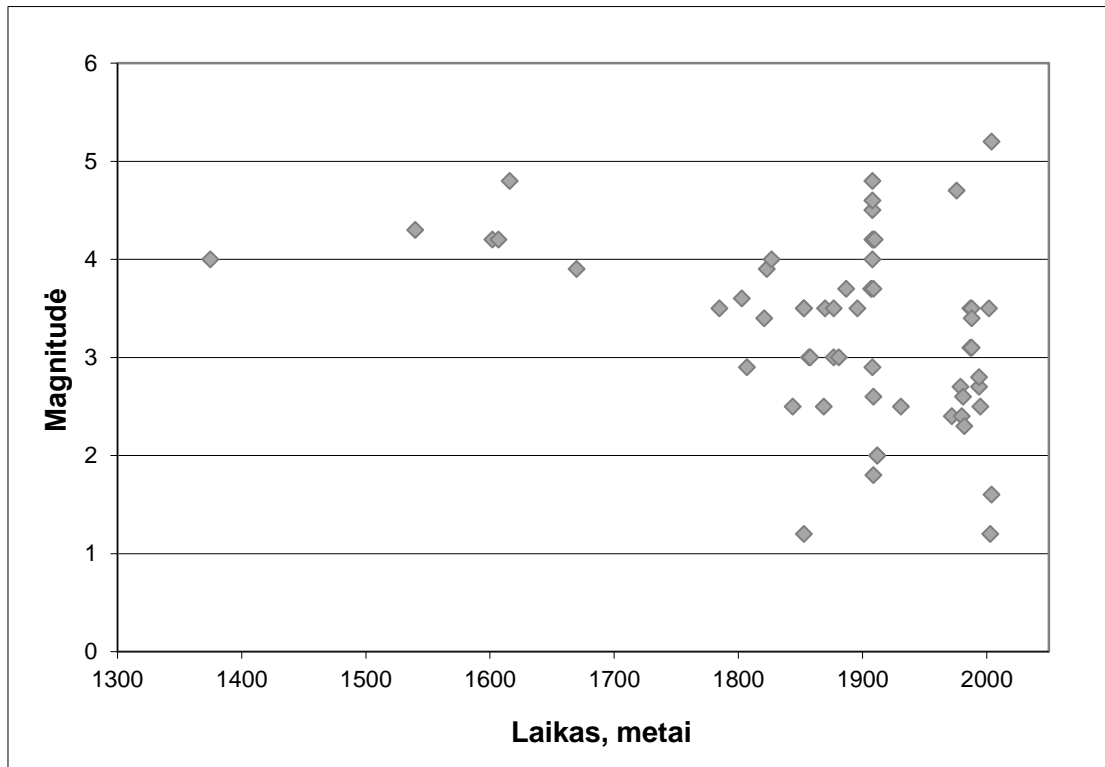
Atvaizdavo šiame darbe sudarytą Jungtinio Rytų Baltijos katalogo žemės drebėjimų pasiskirstymą laike (3.2.1 pav.), buvo nagrinėtas katalogo pilnumas. Pastebėta natūrali tendencija – kuo įvykiai senesni, tuo mažiau

kataloge silpnesnių įvykių, o artėjant prie dabartinio laiko jų skaičius kataloge didėja.

Jungtinis katalogas apėmė tiek Rytinės Baltijos regiono sausuminę dalį, tiek pačią jūrą. Sausumoje katalogas aprėpė istorinius įvykus, žinomus iš istorinių žmonių liudijimų, ir instrumentinius, užfiksuotus seisminėse stotyse. Jūrinėje katalogo dalyje galima atrasti tik instrumentiškai užfiksuotus įvykius, nes ankstesniais amžiais jūroje vykusių drebėjimų aprašymų nėra žinoma.

Tik vienas seisminis įvykis nuo 1912 m. iki 1972 m. patenka į Jungtinių Rytų Baltijos katalogą. Buvo neaišku, ar toks žemės drebėjimų nebuvimas šiuo periodu yra natūralus gamtinis reiškinys ar seisminiai įvykiai nebuvo užfiksuoti dėl istorinių-socialinių perturbacijų, o būtent – I ir II pasaulinių karų, 1917 m. revoliucijos Rusijoje ir stalinizmo epochos Sovietų sąjungoje. Todėl, siekiant išnagrinėti abi šias galimas hipotezes, buvo nuspręsta naudoti „pilną“ katalogą nuo 1844 iki 2009 m. ir „dirbtinai sutrumpintą“ pilno katalogo versiją. Du laiko periodai buvo dirbtinai pašalinti iš pilno katalogo: pirmasis periodas apėmė 1914–1920 m., kuris siejamas su I Pasauliniu karu, 1917 m. Rusijos revoliucija ir kelis metus po jo. Šio laikotarpio pabaiga siejama su žurnalo „Kosmos“ pasirodymu Lietuvoje. Žurnale buvo publikuoti straipsniai apie įvairius gamtos reiškinius, pvz., nuošliaužas prie Nemuno 1925 m., tačiau nebuvo nė vienos užuominos apie vietinius seisminius įvykius. Antras laikotarpis apėmė 1940–1958 m. ir buvo siejamas su Baltijos šalių okupacija, II Pasauliniu karu iki Stalino valdymo laikmečio pabaigos. Šio periodo pabaiga siejama su Tarybų Sąjungos Komunistų partijos XX suvažiavimu 1958 m. ir stalinizmo laikmečio pasmerkimu.

„Dirbtinai sutrumpintas“ katalogas yra 24 metais trumpesnis, lyginant su „pilnu“ katalogu, t.y., katalogas apėmė laikotarpį nuo 1868 m. iki 2009 metų, o seisminiai įvykiai buvo panaudoti nuo 1844 iki 2009 m. Šis „sutrumpintas“ katalogas kažkiek padidino seiminio pavojingumo lygmenį vėlesniuose skaičiavimuose, kita vertus, toks Jungtinio Rytų Baltijos katalogo sutrumpinimas galėjo įskaičiuoti ir tuos praeities žemės drebėjimus, kurie galimai nebuvo užregistruoti vykstant istorinėms-socialinėms perturbacijoms.



3.2.1 pav. Jungtinio Rytų Baltijos katalogo žemės drebėjimų magnitudžių pasiskirstymas laike. Viršutinis paveikslas vaizduoja laikotarpį nuo 1300 m. iki 2009 m., apatinis paveikslas – laikotarpį nuo 1800 m. iki 2009 metų.

Magnitudžių pasiskirstymas

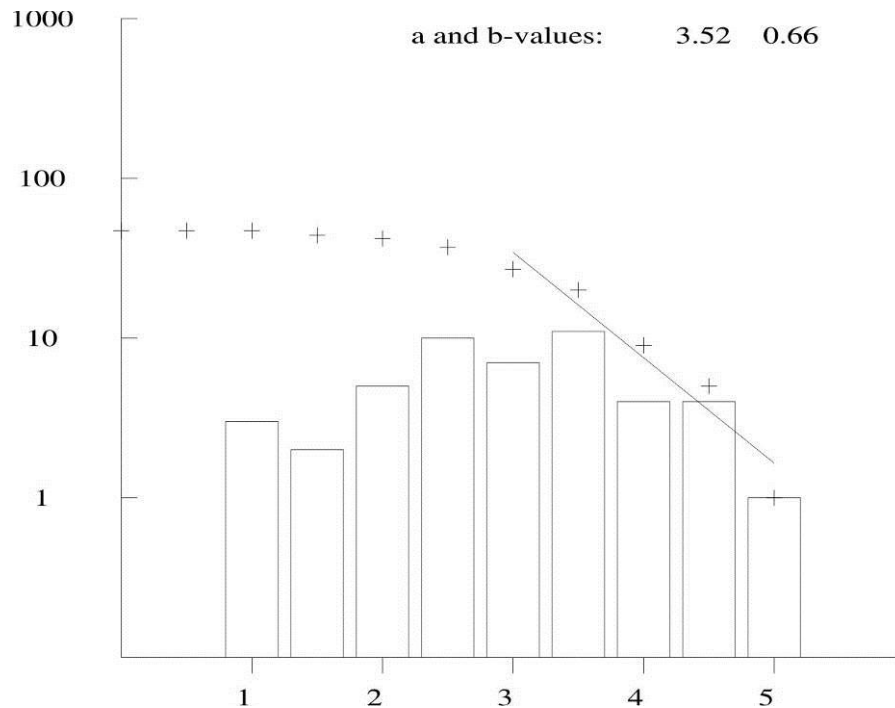
Jeigu norima apskaičiuoti SZ parametą b (2.1.2 lygtis), kuris nusako silpnėsių ir stipresnių seisminių įvykių kiekių pasiskirstymą, taikant statistinius metodus, seisminiame kataloge reikia turėti pakankamai daug seisminių įvykių. Rytų Baltijos regiono seisminiame kataloge įvykių skaičius nėra didelis, o įvykių skaičius kiekvienoje SZ yra dar mažesnis. Taigi, informacijos trūkumas lemia, kad parametro b vertė kiekvienai zonai negali būti tiksliai įvertinta. Geologinės struktūros ir tektoninės įtampos yra gan homogeninės visoje tiriamoje srityje (Zakarevičius et al., 2008), todėl buvo priimta, jog parametro b vertė yra vienoda visam regionui ir tuo pačiu visoms zonoms. Parametras b buvo apskaičiuotas naudojant jungtinį Rytų Baltijos katalogą, jo vertė buvo nustatyta lygi 0,66 (su standartinis nuokrypis 0,12). Šio parametro nustatymui naudota programa BVALUE iš SEISAN 8.3 programų paketo (3.2.2 pav.).

Tyrėjas Saari, (2000) nustatė, kad seisminės zonos, prasidedančios Alandų archipelage Baltijos jūroje, besitęsiančios per Estijos teritoriją ir užsibaigiančios ties Pskovu (Rusija), b parametras yra lygus $0,73 \pm 0,07$, t.y. paklaidų ribose sutampa su Rytų Baltijos regionui nustatyta b verte. Tačiau kiti tyrėjai (Mantiniemi et al., 2001) nustatė, kad Suomijos teritorijoje $b = 0,87 \pm 0,03$, o visai Fenoskandijai $b = 0,84 \pm 0,02$. Toks maždaug Rytų Baltijos, Suomijos ir visos Fenoskandijos b verčių neatitikimas (15 - 12%) gali būti aiškinamas gana skirtingu seismingumo lygiu Rytų Baltijos regione ir Fenoskandijoje (pav. 1.1.1) bei ilgesniu instrumentinių stebėjimų periodu Fenoskandijos valstybėse.

Pasauliniu mastu intrakratoniniams regionams b vertė buvo įvertinta lygi 0,84 (Okal and Sweet, 2007), o nagrinėjant atnaujintą Rytų Europos platformos seisminių įvykių katalogą nuo seniausių laikų iki 2005 m. buvo nustatyta, kad $b = 0,8 \pm 0,08$ (Шаров Н. В. и др., 2007).

Šioje vietoje vėl susidurta su neapibrėžtumu kurią b parametro vertę pasirinkti vertinant Rytų Baltijos seisminį pavojingumą. Buvo nuspręsta naudoti dvi alternatyvas: $b = 0,66 \pm 0,12$, t.y. kokia buvo gauta nagrinėjant jungtinį

Rytų Baltijos seisminį katalogą, ir $b = 0,8 \pm 0,05$, t.y. kokia buvo gauta iš atnaujinto Rytų Europos platformos seisminių įvykių katalogo.



3.2.2 pav. Magnitudžių pasiskirstymas skirtinguose intervaluose. Absisių ašis vaizduoja žemės drebėjimų magnitudes, o ordinačių ašis – seisminių įvykių skaičių. Stulpai rodo skirtingų magnitudžių kiekį skirtinguose intervaluose. Kryžiai žymi suminį magnitudžių pasiskirstymą; tiesi linija rodo parametro b parametro vertę.

Seismogeninių zonų parametrai

Norint atlikti tam tikros teritorijos seisminio pavojingumo vertinimą pagal TSPV metodiką reikalinga kiekvieną išskirtą SZ charakterizuoti atitinkamais parametrais: b ir jo standartinio nuokrypio verte, seisminio aktyvumo parametru a, slenkstine magnitute M_0 , maksimalia stebėta magnitute (M_{obs}), maksimalia galima magnitute (M_{max}), žemutine magnitudės riba (M_{min}) ir vidutiniu žemės drebėjimų hipocentūrų gyliu.

Kaip aprašyta ankstesniame skyrelyje, buvo nuspręsta naudoti dvi b parametro verčių alternatyvas. Maksimalios kiekvienos SZ stebėtos magnitudžių vertės nustatytos analizuojant kiekvienos SZ seisminių įvykių subkatalogus. Maksimalios galimos magnitudės buvo paskaičiuotos remiantis

bendra mažai seismiškai aktyviems regionams priimta praktika – 0,5 magnitudės vertės pridėdant prie didžiausios stebėtos magnitudės toje zonoje (pvz. dePolo and Slemmons, 1990; Chen and Scawthorn, 2003).

Žemutinė magnitudės riba (M_{\min}) yra tokia magnitudė, kai silpnesni seisminiai įvykiai nebenaudojami seismo pavojingumo skaičiavimuose. Daugelis seismo pavojingumo tyrimų priima, kad $M_{\min} = 4,0$ (Bender and Campbell, 1989). Tačiau, pvz., vertinant Prancūzijos seisminį pavojingumą M_{\min} buvo priimtas lygus 3,5 (Beauval and Scoti, 2004), o vertinant Egipto pavojingumą tam tikroms SZ buvo priimta $M_{\min} = 2,8$ (Mohamed et al., 2012). Todėl Rytų Baltijos regione, turint negausų seisminių įvykių katalogą ir vos kelis seisminius įvykius vienoje SZ, buvo nuspręsta laikyti žemutinę magnitudžių ribą $M_{\min} = 3,5$.

Seismo aktyvumo parametras a nusako vidutinį seisminių įvykių, stipresnių nei M_0 per vienus metus tam tikroje SZ, skaičių. Siekiant nustatyti kiekvienos SZ parametras a , naudojantis programa EPIMAP, buvo sudaryti kiekvienos SZ seisminių įvykių subkatalogai. Vėliau, naudojant atskirus subkatalogus ir fiksuotas b parametro vertes (0,66 arba 0,8) pagal 2.1.2 formulę, programos BVALUE pagalba buvo apskaičiuotos seismo aktyvumo parametras a reikšmės kiekvienai SZ.

Kaip minėta Vrančos SZ charakteristikos buvo paimtos iš Mantiniemi et al. (2003) publikacijos. Pastarieji tyrėjai naudojo kiek anksčiau sudarytu Rumunijos žemės drebėjimų katalogu ROMPLUS (Onicescu et al., 1999), kuris buvo laikomas pilnu nuo 1936 iki 1999 m. magnitudėms didesnėms nei 4,5 – todėl M_0 buvo prilyginta būtent 4,5. Kadangi Vrančos SZ pasižymi ženkliai didesniu seisminiu aktyvumu, jos M_{\max} siekia 8,0 ir ji yra gana toli nuo Rytų Baltijos regiono, tai šiai zonai M_{\min} prilygintas 4,0.

Surasti ir apskaičiuoti SZ parametrai pateikti 3.2.1 lentelėje. Kaip minėta, šiame seismo pavojingumo vertinime egzistuoja eilė neapibrėžtumų: katalogo laiko, parametro b ir SZ geometrijos. Todėl 3.2.1 lentelėje pateikti parametrai rinkiniai visoms nagrinėjamos alternatyvoms.

Remiantis bendrai priimtais principais, Poisson'o eksponentinis modelis geriau tinka išsklaidyto (difuzinio) seismingumo zonoms. Jokių charakteringų žemės drebėjimų nebuvo rasta jungtiniame kataloge, todėl buvo priimta, kad žemės drebėjimai pasiskirsto ir atsiranda laike pagal Poisson'o modelį, t.y., žemės drebėjimai gali atsirasti bet kurioje SZ vietoje nepriklausomai nuo anksčiau buvusių įvykių.

3.2.1 lentelė. Seismotektoninių modelių SZ parametrai. „Laiko periodas metais“ – reiškia laiko periodą, kuriame seisminis katalogas yra laikomas pilnu.

Zona	b-reikšmė	Standartinė nuokrypa b-reikšmei	β -reikšmė [b*ln(10)]	β variacija	M_{obs}	M_{max}	a (M_0)	M_{min}	Laiko periodas metais
Seismotektoninio modelio A parametrai									
A1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,087	3,5	1844–2009
A1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,102	3,5	1868*–2009
A1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,120	3,5	1844–2009
A1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,123	3,5	1868*–2009
A2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,095	3,5	1844–2009
A2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,102	3,5	1868*–2009
A2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,123	3,5	1844–2009
A2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,128	3,5	1868*–2009
A3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,046	3,5	1844–2009
A3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,049	3,5	1868*–2009
A3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,059	3,5	1844–2009
A3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,069	3,5	1868*–2009
Seismotektoninio modelio B parametrai									
B0	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,048	3,5	1844–2009
B0	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,061	3,5	1868*–2009
B0	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,052	3,5	1844–2009
B0	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,064	3,5	1868*–2009
B1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,045	3,5	1844–2009
B1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,053	3,5	1868*–2009
B1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,067	3,5	1844–2009
B1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,079	3,5	1868*–2009
B2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,038	3,5	1844–2009
B2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,045	3,5	1868*–2009
B2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,047	3,5	1844–2009
B2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,056	3,5	1868*–2009

B3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,091	3,5	1844–2009
B3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,107	3,5	1868*–2009
B3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,115	3,5	1844–2009
B3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,134	3,5	1868*–2009
B4	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,038	3,5	1844–2009
B4	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,043	3,5	1868*–2009
B4	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,038	3,5	1844–2009
B4	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,056	3,5	1868*–2009
B5	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,064	3,5	1844–2009
B5	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,102	3,5	1868*–2009
B5	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,064	3,5	1844–2009
B5	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,110	3,5	1868*–2009
B6	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,012	3,5	1844–2009
B6	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,015	3,5	1868*–2009
B6	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,012	3,5	1844–2009
B6	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,016	3,5	1868*–2009
Seismotektoninio modelio C parametrai									
C0	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,048	3,5	1844–2009
C0	0,66	0,12	1,52	0,27	3,5	4,0	0,061	3,5	1868*–2009
C0	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,052	3,5	1844–2009
C0	0,80	0,08	1,84	0,18	3,5	4,0	0,064	3,5	1868*–2009
C1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,056	3,5	1844–2009
C1	0,66	0,12	1,52	0,27	5,2	5,7	0,066	3,5	1868*–2009
C1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,077	3,5	1844–2009
C1	0,80	0,08	1,84	0,18	5,2	5,7	0,091	3,5	1868*–2009
C2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,061	3,5	1844–2009
C2	0,66	0,12	1,52	0,27	4,7	5,2	0,071	3,5	1868*–2009
C2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,078	3,5	1844–2009
C2	0,80	0,08	1,84	0,18	4,7	5,2	0,091	3,5	1868*–2009
C3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,089	3,5	1844–2009
C3	0,66	0,12	1,52	0,27	4,5	5,0	0,095	3,5	1868*–2009
C3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,112	3,5	1844–2009
C3	0,80	0,08	1,84	0,18	4,5	5,0	0,120	3,5	1868*–2009
C4	0,66	0,12	1,52	0,27	3,9	4,4	0,012	3,5	1844–2009
C4	0,66	0,12	1,52	0,27	3,9	4,4	0,015	3,5	1868*–2009
C4	0,80	0,12	1,84	0,18	3,9	4,4	0,013	3,5	1844–2009
C4	0,80	0,12	1,84	0,18	3,9	4,4	0,016	3,5	1868*–2009
Vrančos seismotektoninio modelio parametrai									
VR	0,78	0,01	1,79	0,02	7,4	8,0	4,3	4,0	1936–1999

3.3. GRUNTO VIRPESIŲ SLOPIMO FUNKCIJŲ PARINKIMAS

Alternatyvios grunto virpesių slopimo funkcijos

Vienas pagrindinių konkrečiau regiono seisminio pavojingumo modeliavimo etapų – tiriamo regiono specifika atitinkančių seisminių bangų slopimo funkcijų parinkimas. Literatūroje pateikta labai daug įvairių teorinių ir empirinių grunto virpesių slopimo funkcijų. Atsižvelgiant į Baltijos regiono specifika buvo pasirinktos trys alternatyvios funkcijos: Ambraseys et al. (2005), Atkinson and Boore (2006) ir Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c), Campbell and Bozorgnia (2004).

Ambraseys et al. (2005) atliko kelių šimtų stipriausių žemės drebėjimų akselerogramų visapusišką analizę. Šių įvykių epicentrai buvo registruoti Europoje ir Artimųjų Rytų regione. Ambraseys et al. (2005) pasiūlyta horizontalių grunto virpesių slopimo funkcija buvo naudojama šiame tyrime, nes šis sąryšis įskaito skirtingų fokalinių mechanizmų įtaką, o kiti autoriai retai kada pateikia tokius sąryšius. Be to, šis sąryšis leidžia apskaičiuoti grunto virpesių spektrą. Pagal Ambraseys et al. (2005), horizontalių grunto maksimalus virpesių pagreitis (PGA) arba spektrinis pagreitis y gali būti išreikštas:

$$\log y = a_1 + a_2 M_W + \sqrt{(a_3 + a_4 M_W) \log(d^2 + a_5^2)} + a_6 S_S + a_7 S_a + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_O, \quad (3.3.1)$$

čia M_W – įvykio momento magnitudė; d – epicentrinis atstumas; $S_S = 1$, kai gruntas minkštas, ir $S_S = 0$ priešingu atveju; $S_a = 1$, kai gruntas kietas, ir $S_a = 0$ priešingu atveju; $F_N = 1$ sprūdžiui ir 0 priešingu atveju; $F_T = 1$ stūmiui ir 0 priešingu atveju; $F_O = 1$ antstūmiui ir 0 priešingu atveju; $a_1 \dots a_{10}$ – koeficientai (Ambraseys et al., 2005).

Dauguma seismogeninių lūžių tiriamoje srityje tęsiasi PV-ŠR ir ŠV-PR kryptimis. Atlikti tektoninių įtampų matavimai Centinėje Europoje (Grünthal and Stromyer, 1992); Lietuvoje (Šliaupa ir Zakarevičius, 2000) ir Fenoskandijos eksperimentai (Lundqvist and Lagerbäck, 1976; Lagerbäck, 1979; Gregersen and Basham, 1989) parodė, kad maždaug 50% žemės drebėjimų atsiranda dėl stūmio, 40% – dėl antstūmio ir 10% – dėl spūdzio lūžių mechanizmų.

Atkinson ir Boore (2006) pasiūlyta seisminių virpesių slopimo funkcija pagrįsta stabilaus Rytinio Šiaurės Amerikos kratono tyrimais, todėl gali būti taikoma modeliuojant grunto virpesius Rytų Baltijos regione. Slopimo sąryšis buvo sukurtas siekiant įvertinti virpesius kietose uolienose ir minkštuose gruntuose, esant seisminių įvykių magnitudėms nuo $M = 3,5$ iki $M = 8,0$. Dėl to šis seisminių virpesių slopimo sąryšis atitinka tyrimo reikalavimus, nes Rytų Baltijos regione žemės drebėjimai nėra stiprūs. Anot Atkinson ir Boore (2006), horizontalių grunto maksimalus virpesių pagreitis (PGA) y gali būti išreikštas:

$$\log y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + (c_4 + c_5) f_1 + (c_6 + c_7 M) f_2 + (c_8 + c_9 M) f_0 + c_{10} R_{cd} + S, \quad (3.3.2)$$

čia $c_1 \dots c_{10}$ – koeficientai (Atkinson and Boore, 2006); M – magnitudė; R_{cd} – trumpiausias atstumas nuo lūžio arba SZ tam tikro taško iki aikštelės,

$$f_0 = \max(\log(R_0/R_{cd}), 0), \quad (3.3.3)$$

$$f_1 = \min(\log(R_{cd}), \log(R_1)), \quad (3.3.4)$$

$$f_2 = \max(\log(R_{cd}/R_2), 0), \quad (3.3.5)$$

$R_0 = 10$; $R_1 = 70$; $R_2 = 140$ ir $S = 0$ kietoms uolienoms, ir S minkštomis uolienoms yra išreiškiama:

$$S = \log\{\exp[(b_{lin}\ln(V_{30}/V_{ref})) + b_{nl}\ln(60/100)]\}, \quad (3.3.6)$$

čia b_{lin} – koeficientas, V_{30} – skersinių bangų greitis viršutiniame 30 m sluoksnyje; $V_{ref} = 760$ m/s;

$$b_{nl} = b_2 \ln(V_{30}/V_{ref})/\ln(300/V_{ref}), \quad (3.3.7)$$

čia b_2 – koeficientas (Atkinson and Boore, 2006).

Trečias modelis pagrįstas Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c) ir Campbell and Bozorgnia (2004) lygtimi. Šio trečio grunto virpesių slopimo funkcijos autoriai analizavo 1403 akselogramas užregistruotas įvykus 85 žemės drebėjimams visame pasaulyje. Šių autorių nustatytas grunto virpesių slopimo funkcija tiko Rytų Baltijos regionui, nes analizuoti žemės drebėjimai buvo seklūs, t.y. jų hipocentrus gylyai nebuvo gilesni negu ~40 km ir viena grunto virpesių slopimo funkcijos modifikacija aprašė PGA vidutinio kietumo gruntui. Pagal Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c) ir Campbell and Bozorgnia (2004), horizontalių grunto maksimalus virpesių pagreitis (PGA) y gali būti išreikštas:

$$\ln y = c_1 + f_1(M_W) + c_4 \ln \sqrt{f_2(M_W, r_{seis}, S)} + f_3(F) + f_4(S) + f_5(HW, F, M_W, r_{seis}), \quad (3.3.8)$$

čia M_W – žemės drebėjimo momento magnitudė, r_{seis} – trumpiausias atstumas nuo lūžio arba SZ tam tikro taško iki aikštelės, magnitudės įtaką charakterizuojanti funkcija yra išreikšta taip:

$$f_1(M_W) = c_2 M_W + c_3 (8.5 - M_W)^2, \quad (3.3.9)$$

epicentrinio atstumo įtaką charakterizuojanti funkcija išreikšta taip:

$$f_2(M_W, r_{seis}, S) = r_{seis}^2 + g(S)^2 (\exp[c_8 M_W + c_9 (8.5 - M_W)^2])^2, \quad (3.3.10)$$

čia netoli SZ esančių vietinių sąlygų funkcija $g(S)$ išreikšta taip:

$$g(S) = c_5 + c_6(S_{VFS} + S_{SR}) + c_7 S_{FR}, \quad (3.3.11)$$

čia $S_{VFS} = 1$ labai kietam gruntui, $S_{SR} = 1$ minkštai uolienai, $S_{FR} = 1$ kietai uolienai, $S_{VFS} = S_{SR} = S_{FR} = 0$ vidutinio kietumo gruntui, o drebėjimo fokalinis mechanizmas išreškiamas funkcija:

$$f_3 = c_{10} F_{RV} + c_{11} F_{TH}, \quad (3.3.12)$$

čia $F_{RV} = 1$ anstrūdis tipo fokaliniam mechanizmui, $F_{TH} = 1$ antstūmio tipo fokaliniam mechanizmui, $F_{RV} = F_{TH} = 0$ stūmio ir sprūdžio tipo fokaliniam mechanizmui, o toli nuo šaltinio esančių vietinių sąlygų funkcija:

$$f_4(S) = c_{12} S_{VFS} + c_{13} S_{SR} + c_{14} S_{FR}, \quad (3.3.13)$$

kabančio sparno (*hanging wall; HW*) funkcija:

$$f_5(HW, F, M_W, r_{seis}) = 0, \text{ kai } M_W \leq 5,5, \quad (3.3.14)$$

ir

$$f_5(HW, F, M_W, r_{seis}) = M_W - 5,5, \text{ kai } 5,5 \leq M_W \leq 6,5, \quad (3.3.15)$$

koeficientų reikšmės pateiktos publikacijoje Campbell and Bozorgnia (2003a).

Seisminių virpesių slopimas Rytų Baltijos regione

Baltijos regione seisminių stočių tinklas yra retas, o iki Kaliningrado žemės drebėjimų 2004 m. buvo seisminių stočių buvo dar mažiau. Stotčių, kurios būtų buvusios netoli Žemės drebėjimų epicentru, beveik nėra, todėl beveik neįmanoma nustatyti Žemės virpesių sklidimo dėsninumus regione. Tyrimus komplikuoja ir tai, kad kai kurios artimiausios seisminės stotys (pvz.: GKP ir WAR (Lenkija) ar BSD (Bornholmo sala, Danija) yra netoli TTZ. Zona veikia ir slopina Žemės drebėjimų sukeltas seismines bangas (pvz., Guterch, 2009).

Regione itin retai pasitaiko stipresnių žemės drebėjimų, todėl neįmanoma išplėtoti patikimo regioninio seisminių virpesių slopimo modelio. Todėl vertinant Rytų Baltijos seisminį pavojingumą buvo naudojamos panašioms regionams sudarytos virpesių slopimo funkcijos, kurios aptartos ankstesniame skyrelyje.

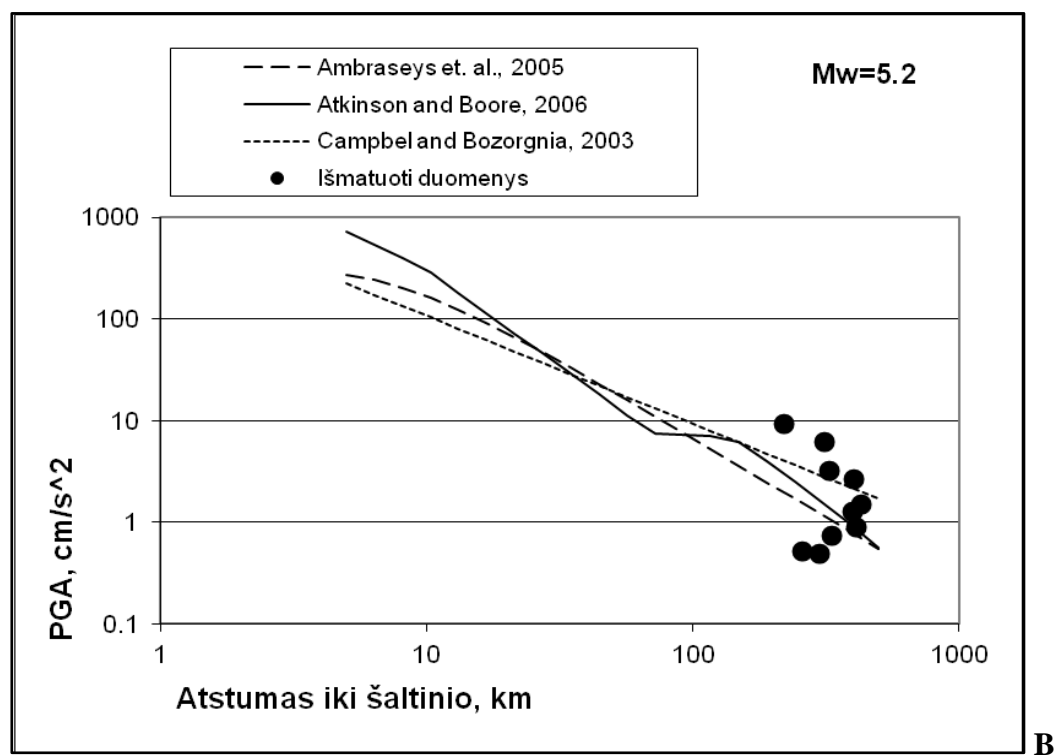
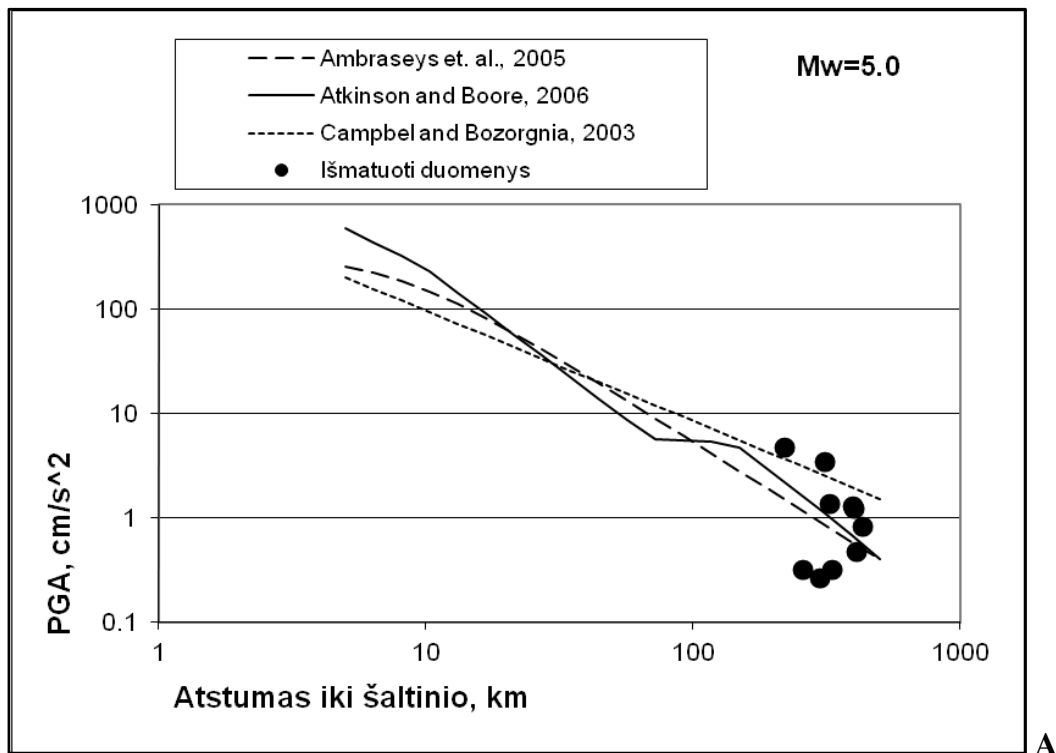
2004 m. Kaliningrado žemės drebėjimai buvo viena iš retų progų, kai buvo galima gauti šiek tiek informacijos apie stipresnių žemės drebėjimų sukeltų seisminių virpesių slopimą nagrinėjamame regione.

Maksimalūs grunto dalelių pagrečiai (PGA), užregistruoti dešimtyje artimiausių seisminių stočių yra nurodyti 3.3.1 lentelėje ir 3.3.1 pav. Iš lentelės duomenų galima pastebėti, kad šios vertės neatrodo tiesiogiai susijusios su nuotoliu. Epicentriniai atstumai WAR ir BLEU yra panašūs, tačiau PGA verčių skirtumas yra didžiulis. Natūralu, kad didžiausios vertės stebėtos artimiausioje stotyje SUW, tačiau GKP buvo tik 39 km toliau negu SUW, o PGA vertės skyrėsi 15 – 18 kartų. Tokį ženklų skirtumą galima aiškinti tuo, kad SUW yra ant Rytų Europos kratono, o GKP yra įrengta virš gana nevienalytiškos TTZ. Ignalinos AE seisminio tinklo stotys turėjo tik trumpaperiodžius vertikalius seisminius daviklius įrengtus 30 m gylio gręžiniuose. Paprastai yra laikoma, kad vertikalūs virpesiai sudaro 2/3 nuo maksimalių horizontalių virpesių. Todėl buvo panaudota atitinkama pataisa.

3.3.1 pav. pateiktos dviejų stipriausių 2004 m. Kaliningrado drebėjimų išmatuotos grunto virpesių pagreičių vertės ir jų palyginimas su trimis šiam tyrimui pasirinktomis virpesių slopimo funkcijomis. Nors išmatuotų verčių išsibarstymas yra gana ženklus, o epicentriniai atstumai neapima norimai plataus diapazono, visgi galima teigti, kad pasirinktos virpesių slopimo funkcijos gana gerai atitinka realų seisminių virpesių sklidimą ir slopimą Rytų Baltijos regione.

3.3.1 lentelė. 2004 m. dviejų stipriausių Kaliningrado žemės drebėjimų sukeltų virpesių maksimalios grunto dalelių pagreičių vertės ($PGA \text{ cm/s}^2$), kurios buvo išmatuotos artimiausiose seisminėse stotyse. Simboliai skliaustuose prie seisminių stočių kodų nurodo valstybę kurioje seisminė stotis yra įrengta: PL reiškia Lenkiją, S – Švediją, DK – Daniją, LT – Lietuvą.

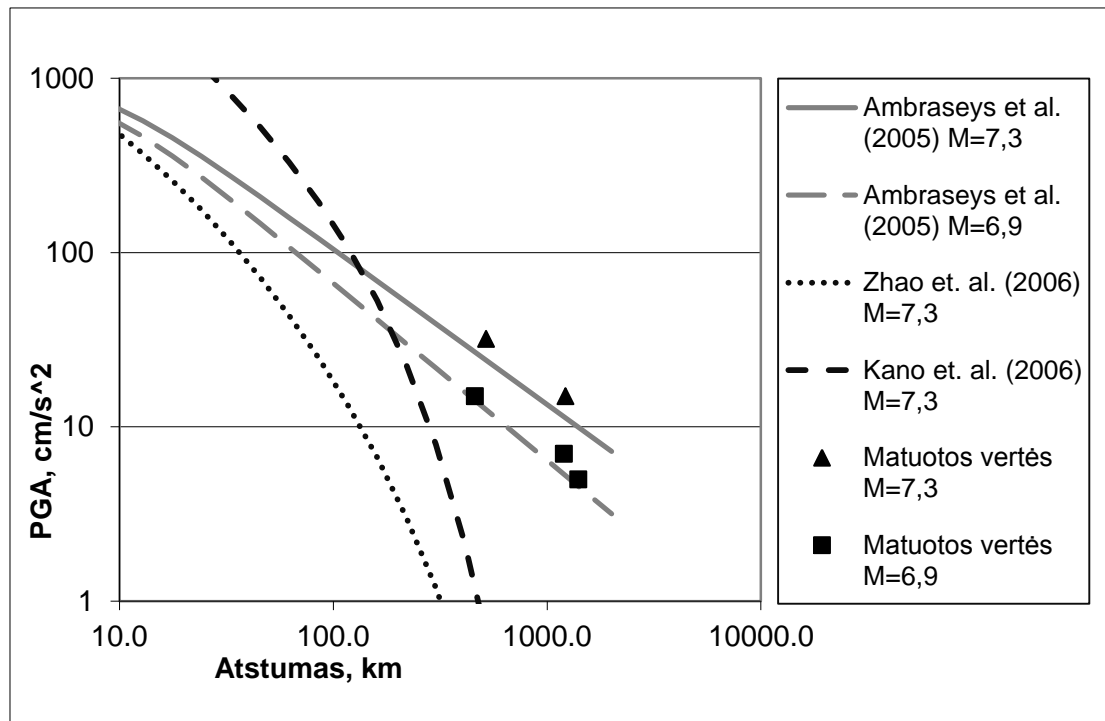
Stoties kodas	Epicentrinis atstumas, km	Azimutas, laipsniais	PGA, cm/s^2 ($M_w = 5,0$)	PGA, cm/s^2 ($M_w = 5,2$)
SUW (PL)	220	114	4.71	9.31
GKP (PL)	259	227	0.32	0.51
WAR (PL)	299	168	0.26	0.49
BLEU (S)	313	302	3.45	6.22
GOTU (S)	326	343	1.37	3.22
BSD (DK)	332	276	0.32	0.74
ISAL (LT)	398	76	1.28	1.26
IIGN (LT)	402	80	1.23	2.67
IZAR (LT)	409	74	0.47	0.90
IDID (LT)	430	81	0.83	1.50



3.3.1 pav. Realiai išmatuotų 2004 m. pirmojo (A pav., $M_w = 5,0$) ir antrojo (B pav., $M_w = 5,2$) Kaliningrado žemės drebėjimų sukeltų grunto dalelių maksimalių virpesių pagreičių verčių (3.3.1 lentelė) palyginimas su teorinėmis grunto virpesių pagreičių slopimo funkcijomis pagal Ambraseys et al., (2005); Atkinson and Boore (2006) ir Campbell and Bozorgnia (2003a).

Seisminių virpesių slopinimas Rytų Europos platformoje

Seisminių virpesių slopinimo funkcija skirta nuo Vrančos SZ ateinantiems virpesiams buvo atskiras uždavinys. Visų Rytinės Baltijos regione nagrinėtų žemės drebėjimų židiniai buvo Žemės plutoje. Tuo tarpu Vrančos SZ didžioji dalis stipriausių žemės drebėjimų židinių buvo pasiskirstę nuo 100 iki 150 km gylio litosferoje. Dėl tokio didelio žemės drebėjimų gylio iš pradžių buvo matyta, kad jų seisminių virpesių funkcijas geriausiai turėtų aprašyti gilių židinių žemės drebėjimai. Buvo eksperimentuota su dviejų autorių pateiktomis seisminių virpesių funkcijomis pritaikytomis subdukcijos zonoms, kur žemės drebėjimų židiniai gali siekti iki 600 – 700 km gylio (Zhao et al., 2006; Kano et al., 2006).



3.3.2 pav. 1940 m. (juodi trikampiai) ir 1977 m. (juodi kvadratai) Vrančos drebėjimų sukeltų grunto paviršiaus virpesių intensyvumų palyginimas su teorinėmis seisminių virpesių slopinimo funkcijomis. : juoda taškuota linija atitinka M = 7,3 Zhao et al. (2006), juoda trumpai brūkšniuota linija – M = 7,3 Kano et al. (2006), pilka vientisa linija – M = 7,3 Ambraseys et al. (2005), pilka brūkšniuota linija – M = 6,9 Ambraseys et al. (2005).

Kita vertus makroseisminių įvertinimų kaip sklinda Vrančos drebėjimų sukelti virpesiai buvo tik keletas. Kelias gana prastos kokybės schemas pavyko surasti tik Никонов (2006) monografijoje (pvz. 1.2.1 pav.).

Sugretinus subdukcijos zonoms pritaikytas seisminių virpesių slopimo funkcijas (Zhao et al., 2006; Kano et al., 2006) su realiai įvertintomis Rytų Europos platformai, paaiškėjo, kad jos gana ženkliai skiriasi (3.3.2 pav.). Tuo tarpu pabandžius pritaikyti Ambraseys et al., (2005), paaiškėjo, kad jos gana gerai atitinka žemės grunto virpesių intensyvumus (3.3.2 pav.). Todėl buvo nuspręsta Vrančos drebėjimų sukeltų seisminių virpesių sklidimą apibūdinti Ambraseys et al., (2005) pasiūlyta seisminių virpesių slopimo funkcija.

3.4. SEISMOTEKTONINIŲ MODELIŲ LOGINIO MEDŽIO SUDARYMAS

Kaip minėta ne viename ankstesniame skyrelyje, aprašančiame TSPV metodo atskirus etapus ir žingsnius, dažnai yra susiduriama su tam tikrais neapibrėžtumais dėl žinių ar duomenų trūkumo. Todėl kuriant Rytų Baltijos regiono seismotektoninį modelį ar modelius nebuvo įmanoma tiksliai aprašyti visų seisminį aktyvumą įtakančių šio regiono faktorių. Siekiant bent dalinai pagerinti tokią situaciją ir gauti suvokimą kokio tikslumo seisminio pavojingumo įvertimai bus gauti buvo sudarytas loginis seismotektoninių modelių medis (3.4.1 pav.).

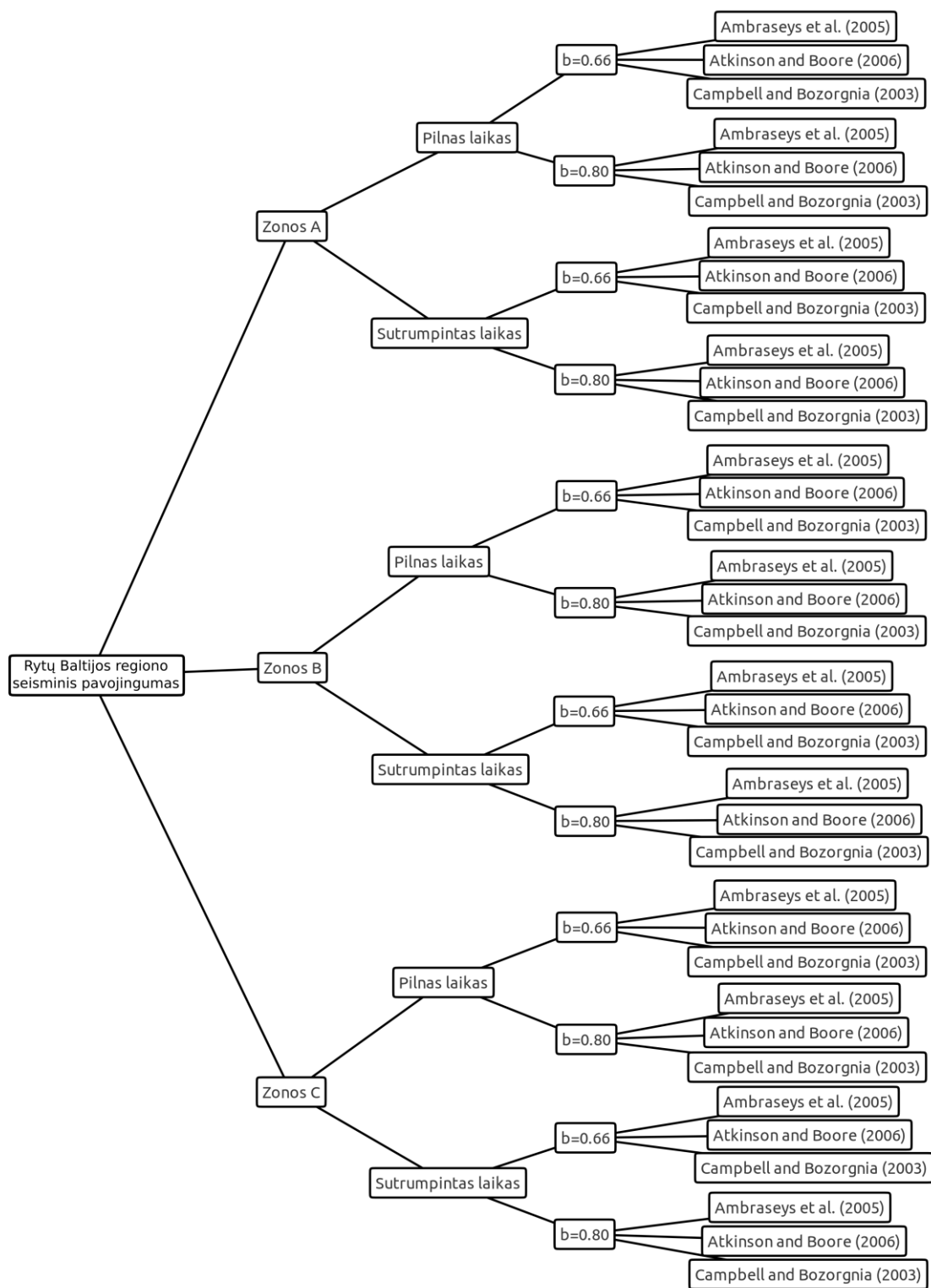
Loginis medis nusako individualias kiekvieno modelio savybes ir pateikia patogų būdą suskaidyti didelį sudėtingą vertinimo uždavinį į mažesnius, paprastesnius ir lengviau suskaičiuojamus komponentus. TSPV metodo loginio medžio rezultatas yra PGA arba spektrinio pagreičio tam tikro pasikartojamumo vertė. Galutinis rezultatas yra gaunamas sumuojant visas galimas alternatyvas su atitinkamais kiekvienos alternatyvos tikimybiniais svoriais.

Pirmiausia buvo sudaryti trys Rytų Baltijos regiono seismotektoniniai modeliai aprašyti skyrelyje „Rytų Baltijos regiono seismotektoniniai modeliai“. Antrame lygmenyje kiekvienam seismotektoniniam modeliui buvo priskirti „Pilno laiko“ ir „Sutrumpinto laiko“ seisminiai katalogai. Trečiame lygmenyje kiekvienai loginio medžio šakai buvo priskirtos dvi galimos parametro b vertės (0,66 ir 0,80). Ir galiausiai ketvirtame lygmenyje kiekvienai medžio šakai buvo priskirta po tris alternatyvias seisminių virpesių slopimo funkcijas: Ambraseys et al. (2005), Atkinson and Boore (2006) ir Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c). Taip buvo gautos 36 loginio medžio šakos ($3 \times 2 \times 2 \times 3 = 36$) arba 36 alternatyvūs modeliai pritaikyti PGA verčių skaičiavimui (3.4.1 pav.).

Kiekviename loginio medžio lygmenyje kiekvienai jo šakai buvo suteiktas atitinkamas svertinis koeficientas. Tarkime dėl tam tikro ekspertinio požiūrio ar dėl kokių nors kitokių objektyvių priežasčių seismotektoninis modelis A yra daugiau tikėtinas negu kiti du likę modeliai B ir C. Tada pvz. modeliui A galima priskirti svertinį koeficientą 0,6, o modeliams B ir C priskirti koeficientus 0,2. Visada viename lygmenyje esančių šakų svertinių koeficientų suma privalo būti lygi vienetui. Šio darbo eigoje nebuvo surasta jokių objektyvių priežasčių laikyti kurią nors galimą alternatyvą labiau tikėtina už kitas. Todėl visos galimos hipotezės kiekviename lygmenyje buvo įvertintos vienodai tikėtinomis.

3.5. SEISMINIO PAVOJINGUMO MODELIAVIMO REZULTATAI

Šiame skyriuje pateiktas seisminio pavojaus vertinimas, taikant TSPV metodiką. Kaip minėta, vertinimui buvo sudaryti trys alternatyvūs seismotektoniniai modeliai su alternatyviais parametrais ir trys alternatyvios seisminių virpesių slopimo funkcijos. Visų įvedamų duomenų rinkiniai buvo organizuoti pasinaudojant loginio medžio metodika (3.4.1.pav. ir 3.2.1 lentelė).



3.4.1 pav. Rytų Baltijos regionui sudarytas TSPV metodo loginis medis.

Pasikartojamumo periodai

Standartiškai naudojant TSPV metodą yra skaičiuojamas maksimalus grunto dalelių virpesių pagreitis (PGA), kuris su 10% tikimybe gali būti viršijamas per 50 metų laikotarpį. Tokia tikimybė atitinka 475 m. pasikartojamumą (angl. *return period*), t.y. apskaičiuotoji PGA vertė vidutiniškai gali būti pasiekta kas 475 m. Tokia tikimybė arba pasikartojamumas yra standartiškai naudojama civilinėje statyboje (Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004). Kita vertus AE statybose yra apibrėžiami kitokie du seisminio pavojingumo lygmenys: SL-1 ir SL-2. AE statybose SL-2 lygmuo yra siejamas su pačiais didžiausiais saugumo reikalavimais ir atitinkamai su pačiu stipriausiu galimu seisminiu poveikiu. Skirtingos valstybės savo nacionaliniuose standartuose SL-2 lygmenį apibrėžia kaip vidutinę tikimybę nuo 10^{-3} iki 10^{-4} , kad numatyta PGA gali būti viršijama kartą per vienerius metus. Arba galima sakyti, kad tai atitinka 1000 ir 10000 m. pasikartojamumą (International Atomic Energy Agency, Seismic design and qualification for nuclear power plants, 2003). SL-1 lygmuo yra siejamas su ne tiek stipriu ir, tuo pačiu daugiau tikėtiniu, seisminiu poveikiu, kuris nėra susietas su AE saugumu, o daugiau su saugiu AE veikimu. Dauguma valstybių savo nacionaliniuose standartuose SL-1 lygmenį apibrėžia kaip vidutinę tikimybę 10^{-2} , kad numatyta PGA gali būti viršijama kartą per vienerius metus. Arba galima sakyti, kad tai atitinka 100 m. pasikartojamumą.

Atsižvelgiant į išdėstytus argumentus, skaičiavimams buvo pasirinkti šie pasikartojamumo periodai: 100, 475, 1000, 10 000 ir 100 000 m.

Apskaičiuotų PGA rezultatai

Atlikus seisminio pavojingumo skaičiavimus buvo gauti du rinkiniai PGA verčių masyvų, atitinkančių du loginių medžių variantus – pirmo, kai buvo vertintos tik Rytų Baltijos SZ, ir antro, kai buvo kartu vertintos Rytų Baltijos SZ ir Vrančos SZ. Kiekvienas PGA verčių masyvas buvo sudarytas iš 180 (36 loginio

medžio šakos padaugintos iš 5 pasikartojamumo periodų) atskirų PGA verčių gardelių (PGA paviršių), atitinkančių tam tikrus seismo zonavimo būdus, SZ parametrus ir slopinimo funkcijų alternatyvas.

Tarpusavyje lyginti keletą paviršių nėra paprastas uždavinys, o palyginti 180 skirtingų paviršių priklausančių nuo keturių tarpusavyje nesusijusių parametrų ir bandyti ieškoti tam tikrų apibendrinimų yra dar sudėtingesnis uždavinys. Todėl buvo panaudota gana paprasta metodika – apskaičiuotas atskirai kiekvienos PGA gardelės (paviršiaus) verčių vidurkis, o po to buvo suvidurkinti visi atskirų PGA gardelių, atitinkančių tą patį pasikartojamumo periodą, vidurkiai. 3.5.1 lentelėje yra pateikti PGA gardelių (paviršių) verčių vidurkiai, kai buvo nagrinėjamas seisminis pavojingumas, įtakotas tik vietinių Rytų Baltijos SZ. Šioje lentelėje PGA gardelių (paviršių) vidurkiai, atitinkantys 100 000 m. pasikartojamumo periodą, išrikiuoti nuo mažiausio iki didžiausio.

3.5.2 lentelėje yra pateikti PGA gardelių (paviršių) verčių vidurkiai, kai buvo nagrinėjamas seisminis pavojingumas, įtakotas kartu tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek ir Vrančos SZ. Šioje lentelėje PGA gardelių (paviršių) vidurkiai išdėlioti tokia pat tvarka kaip ir 3.5.2 lentelėje. Abiejose lentelėse yra pateikti ir atitinkami parametrai, nuo kurių priklausė kiekvienos PGA gardelės (paviršiaus) vertės: AF – grunto virpesių slopinimo funkcijos, SZB – seismotektoninio zonavimo būdo, CT – seismologinio katalogo laiko trukmės ir b – parametro b vertės. Siekiant išvengti kažkokias PGA gardelių (paviršių) priklausomybes nuo keturių nepriklausomų parametrų, kiekvienos parametro vertės celės fono spalvai buvo suteiktas skirtingas pilkumo atspalvis. Tokiu būdu, žvelgiant į 3.5.1 ir 3.5.2 lenteles galima pastebėti tendenciją, kad vidutinės PGA gardelių (paviršių) vertės arba, galima sakyti, apibendrinti seismo pavojingumo lygmenys labiausiai yra įtakojami skirtingų grunto virpesių slopinimo funkcijų (AF) ir seismotektoninio zonavimo būdo (SZB), o skirtingo seismo katalogo laiko (CT) arba parametro b parinkimas vidutinės PGA gardelių (paviršių) vidurkių vertės įtakoja silpniau, kai pasikartojamumo periodai yra ilgi (100 000 ar 10 000 m.). Esant trumpesniems pasikartojamumo periodams (1000, 475 ir 100 m.) PGA gardelių (paviršių) vidurkių vertės daugiau yra įtakojamos skirtingų grunto virpesių slopinimo funkcijų

(AF), skirtingo seisminio katalogo laiko (CT) ir parametro b parinkimo, o seisminio zonavimo būdas (SZB) PGA vidutinės PGA gardelių (paviršių) vidurkių vertės įtakoja silpniau.

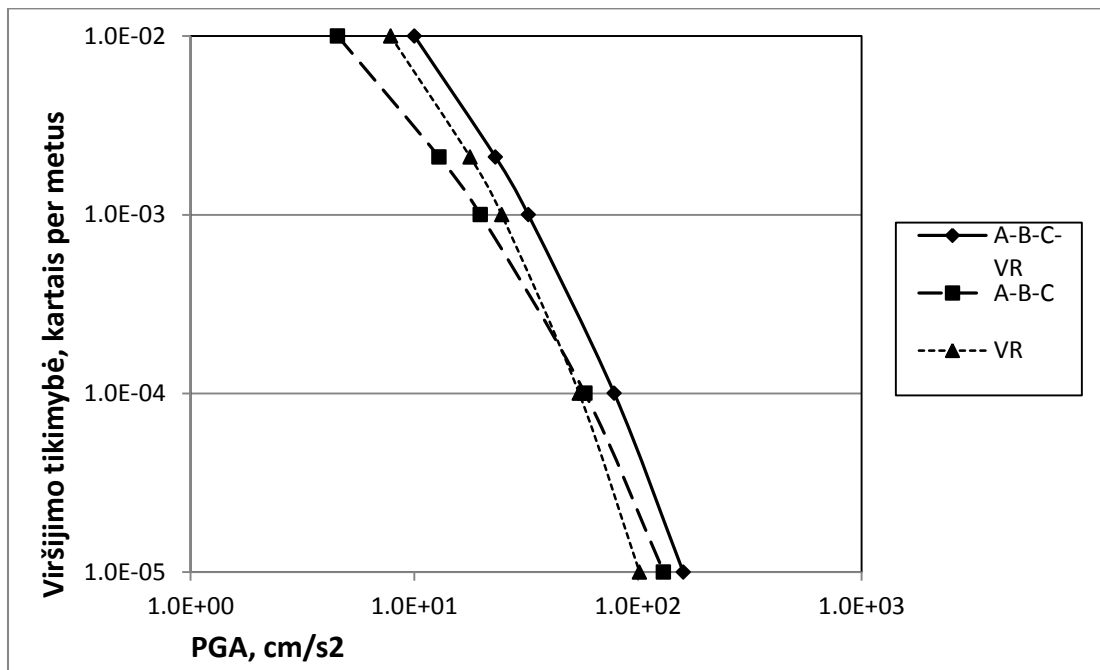
Iš tų pačių 3.5.1 ir 3.5.2 lentelių galima pastebėti natūralią ir savaime suprantamą tendenciją, kad, ilgėjant pasikartojamumo periodui, vidutinės PGA gardelių (paviršių) vidurkių vertės arba apibendrintas seisminio pavojingumo lygmuo, didėja. Kita vertus, jeigu lyginsime 100 000 m. pasikartojamumo PGA gardelių (paviršių) vidurkių vertės, kai skaičiavimams buvo naudoti tik vietinės Rytų Baltijos regiono SZ-nos, su tomis, kai buvo naudojamos tiek vietinės Rytų Baltijos regiono SZ-nos tiek ir Vrančos SZ (3.5.1 ir 3.5.2 lentelės) pastebėsime, kad PGA gardelių (paviršių) vidurkiai kinta nuo 72 iki 181 cm/s^{-2} (vidurkių vidurkis yra 130 cm/s^{-2}) pirmu atveju ir nuo 125 iki 199 cm/s^{-2} (vidurkių vidurkis – 161 cm/s^{-2}) antru atveju. Tas leidžia suprasti, kad Vrančos SZ įskaičiavimas į bendrą seismingumą ženkliai įtakoja (~44%) visą Rytų Baltijos regiono seisminį pavojingumą esant 100 000 m. pasikartojamumui. Atitinkamai toks seisminio pavojingumo įtakojimas 10 000 m. pasikartojamumo periodui yra ~48%, 1 000 m. – ~55%, 475 m. – ~58% ir 100 m. – ~64%. T. y., galima teigti, kad trumpėjant pasikartojamumo periodui Vrančos SZ įtaka bendram Rytų Baltijos regiono seisminiam pavojingumui (PGA prasme) didėja. Arba performulavus šią mintį galima teigti, kad Vrančos SZ įskaičiavimas ženkliai (~64%) įtakoja Rytų Baltijos regiono bendrą seisminį pavojingumą 100 m. pasikartojamo periodui, tačiau ilgėjant pasikartojamumo periodams Vrančos SZ įtaka bendram Rytų Baltijos seisminiam pavojingumui mažėja: ~58% – 475 m. pasikartojamumui, ~55% – 1 000 m. pasikartojamumui, ~48% – 10 000 m. pasikartojamumui ir ~44% – 100 000 m. pasikartojamumui. Pastarąją mintį patvirtina ir iliustruoja 3.5.1 pav. Šis paveikslas taip pat parodo, kad Rytų Baltijos seisminį pavojingumą stipriau įtakoja Vrančos SZ kai pasikartojamumo periodai kinta nuo 100 iki ~5 000 m. Pasikartojamumo periodui esant ~5 000 m. Vrančos SZ įtaka susilygina su vietinių Rytų Baltijos SZ-nų įtaka ir toliau pasikartojamumo periodui didėjant Rytų Baltijos seisminį pavojingumą daugiau nulemia vietinės Rytų Baltijos SZ-nos, o Vrančos SZ įtaka mažėja.

3.5.1 lentelė. PGA gardelių (paviršių) [cm/s²] vidurkiai atitinkantys visas nagrinėtas SZ alternatyvas ir skirtingus pasikartojamumo periodus kai vertinti tik Rytų Baltijos vietinės SZ. Čia Nr. yra eilės numeris; AF – grunto virpesių slopimo funkcija, AF1 – Ambraseys et al. (2005), AF2 – Atkinson and Boore (2006), AF3 – Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c), Campbell and Bozorgnia (2004); SZB – seismotektoninio zonavimo būdas; CT – katalogo laikas, FT – pilnas katalogo laikas, ST – dirbtinai sutrumpintas katalogo laikas; b – b parametro vertė.

Nr.	AF	SZB	CT	b	Pasikartojamumo periodai, m.				
					100	475	1000	10000	100000
1	AF2	B	FT	0.66	2.5	7.0	10.7	31.7	72.3
2	AF2	B	FT	0.80	2.7	7.4	11.2	32.2	72.6
3	AF2	B	ST	0.66	2.9	7.7	11.7	34.0	76.2
4	AF2	B	ST	0.80	3.2	8.4	12.5	35.1	77.3
5	AF2	C	FT	0.66	2.4	7.1	11.2	35.8	85.5
6	AF2	C	FT	0.80	2.7	7.7	11.9	36.9	86.5
7	AF2	C	ST	0.66	2.7	7.7	12.1	38.1	89.8
8	AF2	C	ST	0.80	3.0	8.4	12.9	39.3	90.8
9	AF3	B	FT	0.66	5.9	15.1	21.9	56.4	115.3
10	AF3	B	FT	0.80	6.5	15.9	22.8	57.5	116.0
11	AF2	A	FT	0.66	2.3	7.0	11.3	42.5	117.6
12	AF3	B	ST	0.66	6.7	16.6	23.8	60.1	121.0
13	AF3	B	ST	0.80	7.5	17.8	25.3	61.9	122.6
14	AF2	A	ST	0.80	2.7	8.0	12.9	46.4	122.8
15	AF1	B	FT	0.66	4.0	12.4	19.1	56.3	128.1
16	AF1	B	FT	0.80	4.5	13.4	20.4	58.3	131.0
17	AF3	C	FT	0.66	5.6	15.2	22.7	61.9	131.2
18	AF3	C	FT	0.80	6.3	16.4	24.1	63.8	133.0
19	AF1	B	ST	0.66	4.7	13.9	21.2	60.8	136.2
20	AF3	C	ST	0.66	6.2	16.5	24.4	65.4	136.3
21	AF1	C	FT	0.66	3.5	12.2	19.4	60.1	137.5
22	AF3	C	ST	0.80	6.9	17.7	25.9	67.3	138.0
23	AF1	B	ST	0.80	5.5	15.4	22.9	63.4	139.8
24	AF1	C	FT	0.80	4.2	13.6	21.3	63.1	141.7
25	AF1	C	ST	0.66	4.0	13.4	21.1	63.9	144.6
26	AF2	A	FT	0.80	8.9	20.1	28.0	67.8	145.5
27	AF2	A	ST	0.66	3.5	10.0	15.9	57.3	147.3
28	AF1	C	ST	0.80	4.7	14.9	23.2	66.9	148.7
29	AF3	A	FT	0.66	5.3	15.3	23.7	72.3	165.8
30	AF1	A	FT	0.66	3.0	11.4	19.6	70.2	168.4
31	AF3	A	FT	0.80	6.1	17.1	26.1	76.8	171.3
32	AF3	A	ST	0.66	5.7	16.4	25.3	76.1	172.3
33	AF3	A	ST	0.80	6.3	17.6	26.8	78.2	173.7
34	AF1	A	ST	0.66	3.3	12.4	21.2	73.9	175.1
35	AF1	A	FT	0.80	3.7	13.6	23.0	77.2	179.0
36	AF1	A	ST	0.80	3.9	14.1	23.8	78.9	181.9
Vidurkiai, cm/s²					4.5	12.9	19.8	58.0	130.4
Standartinis nuokrypis, cm/s²					1.7	3.8	5.4	14.4	32.0
Standartinis nuokrypis, %					37.0	29.5	27.4	24.9	24.6

3.5.2 lentelė. PGA gardelių (paviršių) [cm/s²] vidurkiai atitinkantys visas nagrinėtas SZ alternatyvas ir skirtingus pasikartojamumo periodus kai vertintos tiek Rytų Baltijos vietinės SZ, tiek ir Vrančos SZ. Čia Nr. yra eilės numeris; AF – grunto virpesių slopimo funkcija, AF1 – Ambraseys et al. (2005), AF2 – Atkinson and Boore (2006), AF3 – Campbell and Bozorgnia (2003 a, b, c), Campbell and Bozorgnia (2004); SZB – seismotektoninio zonavimo būdas; CT – katalogo laikas, FT – pilnas katalogo laikas, ST – dirbtinai sutrumpintas katalogo laikas; b – b parametro vertė.

Nr.	AF	SZB	CT	b	Pasikartojamumo periodai, m.				
					100	475	1000	10000	100000
1	AF2	B	FT	0.66	8.7	19.7	27.4	63.8	124.9
2	AF2	B	FT	0.80	8.8	19.9	27.6	64.2	125.0
3	AF2	B	ST	0.66	8.9	20.1	27.9	65.0	127.0
4	AF2	B	ST	0.80	9.1	20.4	28.3	65.8	127.9
5	AF2	C	FT	0.66	8.7	19.8	27.4	64.8	130.8
6	AF2	C	ST	0.66	8.9	20.0	27.8	66.1	133.6
7	AF2	C	ST	0.80	9.0	20.3	28.2	66.8	134.5
8	AF2	A	FT	0.66	8.7	19.8	27.5	66.5	143.1
9	AF2	A	FT	0.80	8.9	20.1	28.0	67.8	145.5
10	AF2	A	ST	0.80	8.9	20.2	28.2	68.3	146.9
11	AF3	B	FT	0.80	11.1	24.7	34.1	78.2	147.7
12	AF3	B	ST	0.66	11.3	25.2	34.8	79.8	150.9
13	AF3	B	ST	0.80	11.8	26.0	35.8	81.3	152.2
14	AF3	C	FT	0.66	10.7	24.1	33.6	79.9	158.0
15	AF1	B	FT	0.66	10.0	23.7	33.5	80.4	160.8
16	AF3	C	ST	0.66	11.0	24.9	34.7	82.4	161.6
17	AF1	B	FT	0.80	10.3	24.4	34.5	82.1	163.1
18	AF3	C	ST	0.80	11.4	25.7	35.8	84.0	163.2
19	AF1	B	ST	0.66	10.5	24.8	34.9	83.4	166.4
20	AF2	A	ST	0.66	9.3	21.2	29.7	75.3	166.9
21	AF1	C	FT	0.66	9.8	23.3	33.1	82.1	167.5
22	AF1	C	FT	0.80	9.8	23.3	33.1	82.1	167.5
23	AF2	C	FT	0.80	9.8	23.3	33.1	82.1	167.5
24	AF3	C	FT	0.80	9.8	23.3	33.1	82.1	167.5
25	AF1	B	ST	0.80	11.0	25.8	36.3	85.8	169.7
26	AF1	C	ST	0.66	10.0	24.0	34.2	84.7	172.8
27	AF1	C	ST	0.80	10.4	25.1	35.7	87.3	176.7
28	AF3	A	FT	0.66	10.5	24.2	33.8	84.9	180.0
29	AF3	B	FT	0.66	10.5	24.2	33.8	84.9	180.0
30	AF3	A	FT	0.80	11.0	25.2	35.3	88.3	184.9
31	AF3	A	ST	0.66	10.8	24.8	34.8	87.8	185.7
32	AF1	A	FT	0.66	9.6	22.9	32.6	85.6	186.7
33	AF3	A	ST	0.80	11.2	25.6	35.8	89.6	187.0
34	AF1	A	ST	0.66	9.7	23.4	33.4	88.4	192.6
35	AF1	A	FT	0.80	10.0	24.1	34.5	91.0	196.3
36	AF1	A	ST	0.80	10.1	24.4	35.0	92.4	199.0
Vidurkiai, cm/s²					10.0	23.1	32.4	79.0	161.4
Standartinis nuokrypis, cm/s²					0.9	2.1	3.1	8.8	21.1
Standartinis nuokrypis, %					9.0	9.1	9.5	11.2	13.0



3.5.1 pav. Suvidurkintas Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo lygis skirtingiems tikimybės viršijimo (pasikartojamumo) periodams. Čia „A-B-C-VR“ kreivė, parodanti suvidurkintą seisminio pavojingumo lygį, kuris yra sąlygojamas tiek vietinių Rytų Baltijos regiono SZ, tiek ir Vrančos SZ, „A-B-C“ – suvidurkintas pavojingumo lygis, kuris įtakojamas tik vietinių Rytų Baltijos regiono SZ, „VR“ – pavojingumo lygis, kuris įtakojamas tik Vrančos SZ.

PGA žemėlapiai

Vienas iš pagrindinių šio darbo tikslų buvo sudaryti Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapius skirtingiems tikimybių lygmenims. Tam tikros tikimybės lygmens žemėlapiui sudarymui buvo naudotos apskaičiuotos PGA gardelės (paviršiai), kurios atitiko visas 36 loginio medžio alternatyvas. Kadangi anksčiau buvo priimta nuostata, kad visos alternatyvos turi vienodus svertinius koeficientus, tai buvo apskaičiuota PGA gardelė (paviršius), atitinkanti visų 36 alternatyvių PGA gardelių aritmetinį vidurkį, ir panaudojus šią PGA gardelę buvo sudarytas PGA verčių žemėlapis, atitinkantis tam tikrą tikimybės lygmenį.

3.5.4 pav. vaizduoja Rytų Baltijos regiono grunto paviršiaus maksimalių horizontalių pagreičių (PGA) žemėlapi, kuriame pavaizduotos PGA vertės su 10% tikimybe gali būti viršijamos per 50 m. laikotarpį (pasikartojamumo periodas – 475 m.). Sudarant šį paveikslą buvo vertintos tiek vietinės Rytų Baltijos, tiek ir

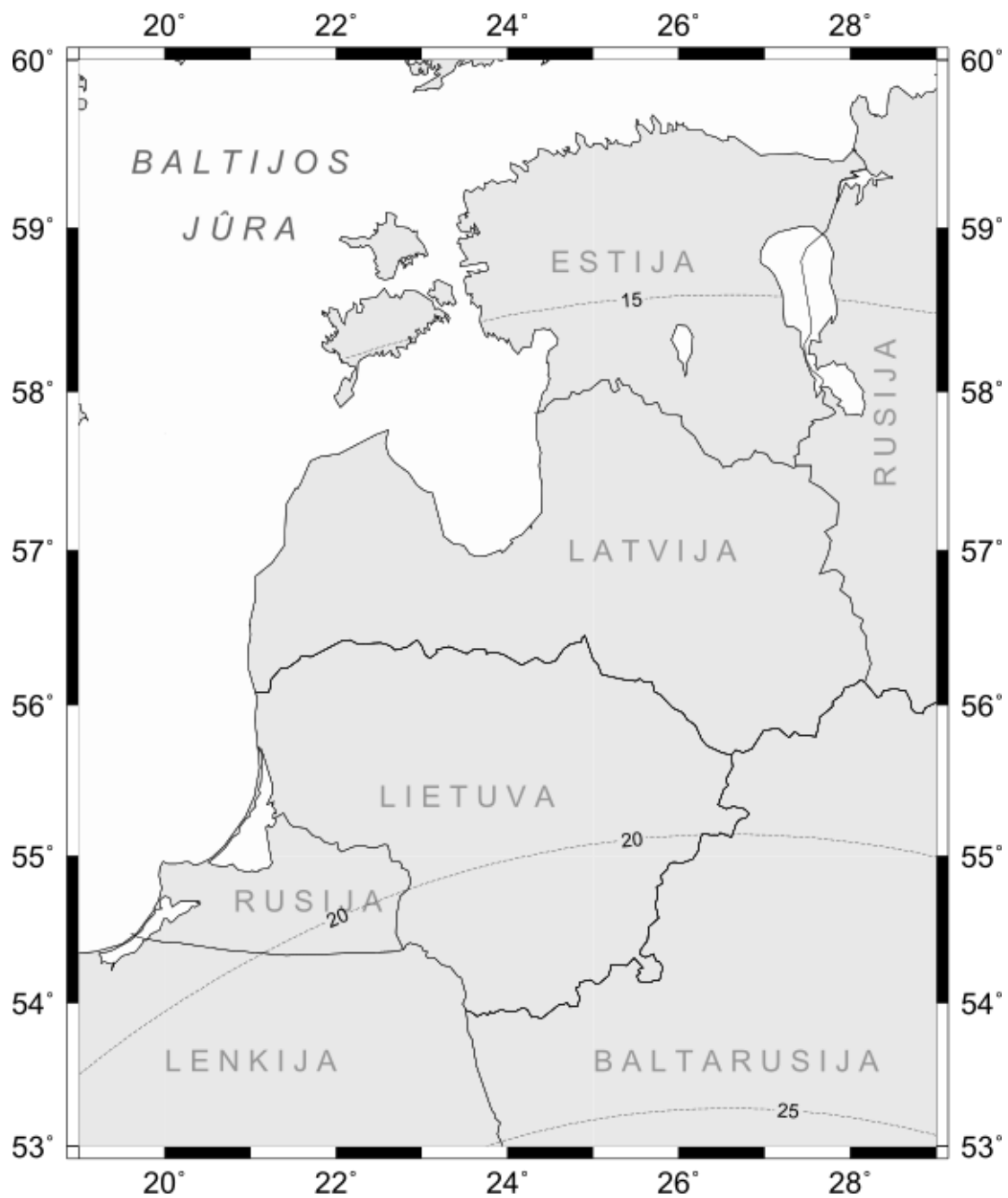
Vrančos SZ. Atitinkamai, 3.5.5 pav. pavaizduotas Rytų Baltijos regiono PGA verčių žemėlapis, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-3} per metus (pasikartojamumo periodas – 1 000 m.); 3.5.6 pav. pavaizduotas PGA verčių žemėlapis, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-4} per metus (pasikartojamumo periodas – 10 000 m.) ir 3.5.7 pav. pavaizduotas PGA verčių žemėlapis, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-5} per metus (pasikartojamumo periodas – 100 000 m.). Sudarant visus šiuos keturis žemėlapius buvo vertintos tiek vietinės Rytų Baltijos, tiek ir Vrančos SZ. Stebima natūrali tendencija – kuo PGA viršijimo tikimybė mažesnė, tuo maksimalios PGA vertės didesnės. Todėl geriausiai PGA geografinio pasiskirstymo (arba paviršiaus) ypatumai išryškėja 100 000 m. pasikartojamumo žemėlapyje (3.5.7 pav.), nors tie patys ypatumai akivaizdžiai egzistuoja ir mažesnių pasikartojamumo laikotarpių žemėlapiuose (3.5.6, 3.5.5 ir 3.5.4 pav.). 3.5.7 pav. pavaizduotame žemėlapyje lokalus PGA maksimumas, siekiantis virš 280 cm/s^2 , stebimas ties Kaliningrado sritimi (A). Vietinis PGA maksimumas, viršijantis 260 cm/s^2 , yra maždaug ties Vilniumi (B). Vietiniai PGA maksimumai viršijantys 240 cm/s^2 , yra vakarinėje Latvijos dalyje (C) ir centrinėje-pietinėje Latvijoje (D). Vietinis PGA maksimumas, viršijantis 220 cm/s^2 , yra vakarinėje Estijos dalyje (E), o vietiniai PGA maksimumai, viršijantys 200 cm/s^2 , yra vakarinėje ir centrinėje Baltarusijoje (F) ir centrinėje-pietinėje Estijoje (G). Prisiminus seismotektoninių modelių sudarymą (3.1.8, 3.1.9 ir 3.1.10 pav. bei 3.2.1 lentelė), gana aiškiai galima pastebėti, kad lokalūs PGA maksimumai Rytų Baltijos seisminio pavojingumo žemėlapiuose siejasi su išskirtomis SZ ir zonų seisminiu aktyvumu (parametras a, 3.2.1 lentelė) bei jų plotu. Vietinis maksimumas A gali būti siejamas su SZ B1 ir C1 erdviniu persiklojimu arba superpozicija. Vietinis maksimumas B gali būti siejamas su SZ B2 ir C1, maksimumas C – su SZ A2, B3 ir C2, maksimumas D – su SZ A2, B3 ir C3, maksimumas E – su SZ B4 ir C2, G – su SZ B5 ir C4, maksimumas F – su SZ A1 ir C1.

3.5.2 pav. pavaizduotas Rytų Baltijos seisminio pavojingumo žemėlapis, kuriame atvaizduotos PGA vertės su 10% tikimybe gali būti viršijamos per 50 m. laikotarpį (pasikartojamumo periodas – 475 m.), ir čia seisminis pavojingumas buvo įtakotas tik Vrančos SZ; vietinės Rytų Baltijos SZ čia neįskaičiuotos. Pagal

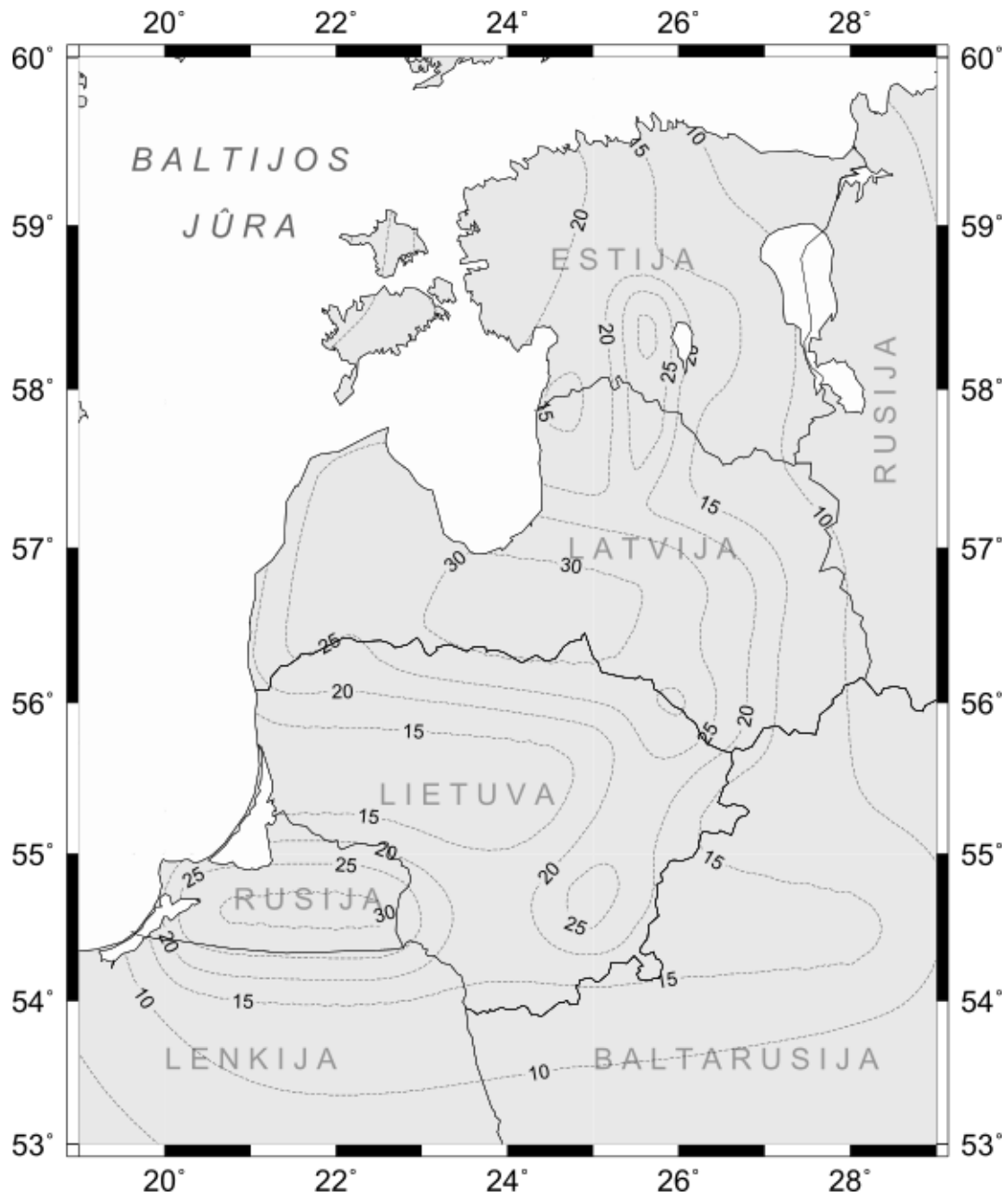
ši žemėlapi Vrančos SZ indukuoja gana tolygų seisminį pavojingumą visame regione. Pačiame pietiniame Rytų Baltijos regiono pakraštyje – Baltarusijoje yra apskaičiuota 25 cm/s^2 PGA vertė. Einant į šiaurę PGA vertės tolygiai mažėja – maždaug per vidurio Lietuvą praeina 20 cm/s^2 PGA izolinija, šiaurinėje Lietuvos dalyje, visoje Latvijoje ir pietinėje Estijos dalyje PGA vertės mažėja nuo 25 iki 15 cm/s^2 , per centinę Estiją praeina 15 cm/s^2 PGA izolinija ir toliau einant į šiaurę iki Baltijos jūros PGA vertės sumažėja iki 13 cm/s^2 (3.5.2 pav.).

3.5.3 pav. pavaizduotas Rytų Baltijos seisminio pavojingumo žemėlapis, kuriame pavaizduotos PGA vertės su 10% tikimybe gali būti viršijamos per 50 m. laikotarpį (pasikartojamumo periodas – 475 m.), kai buvo vertintos tik vietinės Rytų Baltijos SZ, Vrančos SZ įtaka čia nebuvo įskaičiuota. Šiame žemėlapyje lokalūs PGA maksimumai viršija 30 cm/s^2 Kaliningrado srityje ir Latvijos centrinėje-pietinėje dalyje. Vietiniai maksimumai, viršijantys 25 cm/s^2 , stebimi ties Vilniumi, vakarinėje Latvijos dalyje ir Estijos centrinėje-pietinėje dalyje. Kitose Rytų Baltijos regiono vietose PGA vertės varijuoja, tačiau yra mažesnės. Tuo tarpu, suvidurkinus visas 36 gardeles (paviršius) ir apskaičiavus jų vidurkį gaunama, kad vidutinė Rytų Baltijos seisminio pavojingumo vertė (PGA prasme) yra lygi 12.9 cm/s^2 su standartiniu nuokrypiu 3.8 cm/s^2 (3.5.1 lentelė). Kaip minėta 1.4. poskyryje „Seisminio pavojingumo Baltijos regione tyrimai“ 2003 m. buvo baigtas Europos–Viduržemio jūros ESC-SESAME seisminio pavojaus vertinimo projektas (Jiménez et al., 2003). Šiame žemėlapyje buvo pavaizduotos PGA vertės, kurios su 10% tikimybe gali būti viršytos per 50 m. laikotarpį (457 m. pasikartojamumas). Interpretuojant šį žemėlapi galima priimti, kad vidutinis Rytų Baltijos seisminis pavojingumas gali būti prilygintas $\sim 10 \text{ cm/s}^2$. Viena vertus lyginti gana skirtingų mastelių seisminio pavojingumo žemėlapius: visos Europos (Jiménez et al., 2003) ir Rytų Baltijos regiono nėra visiškai korektiška, tačiau PGA, vertės pavaizduotos Europos seisminio pavojingumo žemėlapyje Rytų Baltijos regione ($\sim 10 \text{ cm/s}^2$), ir šiame darbe gautos vidutinės Rytų Baltijos regiono PGA vertės ($12,9 \pm 3,8 \text{ cm/s}^2$) paklaidų ribose sutampa. Todėl galima daryti išvadą, kad šiame darbe apskaičiuotos PGA vertės yra pakankamai patikimos.

3.5.4 pav. pavaizduotas Rytų Baltijos seisminio pavojingumo žemėlapis, kuriame pavaizduotos PGA vertės su 10% tikimybe gali būti viršijamos per 50 m. laikotarpį (pasikartojamumo periodas – 475 m.), kai buvo vertintos tiek vietinės Rytų Baltijos SZ, tiek ir Vrančos SZ. Šiame žemėlapyje lokalūs PGA maksimumai viršija 35 cm/s^2 Kaliningrado srityje, Latvijos centrinėje dalyje ir Estijos centrinėje dalyje. Vietiniai maksimumai, viršijantys 30 cm/s^2 , stebimi ties Vilniumi, didesnėje Latvijos dalyje išskyrus jos šiaurinį pakraštį ir Estijos centrineje-pietinėje dalyje. Kitose Rytų Baltijos regiono vietose PGA vertės varijuoja, tačiau yra mažesnės. Tačiau suvidurkinus visas 36 gardeles (paviršius) ir apskaičiavus jų vidurkį, gaunama, kad vidutinė Rytų Baltijos seisminio pavojingumo vertė (PGA prasme) yra lygi 23,1 su $2,1 \text{ cm/s}^2$ standartiniu nuokrypiu (3.5.2 lentelė). Daugeliu atveju lokalūs maksimumai 3.5.4 pav. yra $\sim 5 \text{ cm/s}^2$ didesni negu lokalūs maksimumai 3.5.3 pav.



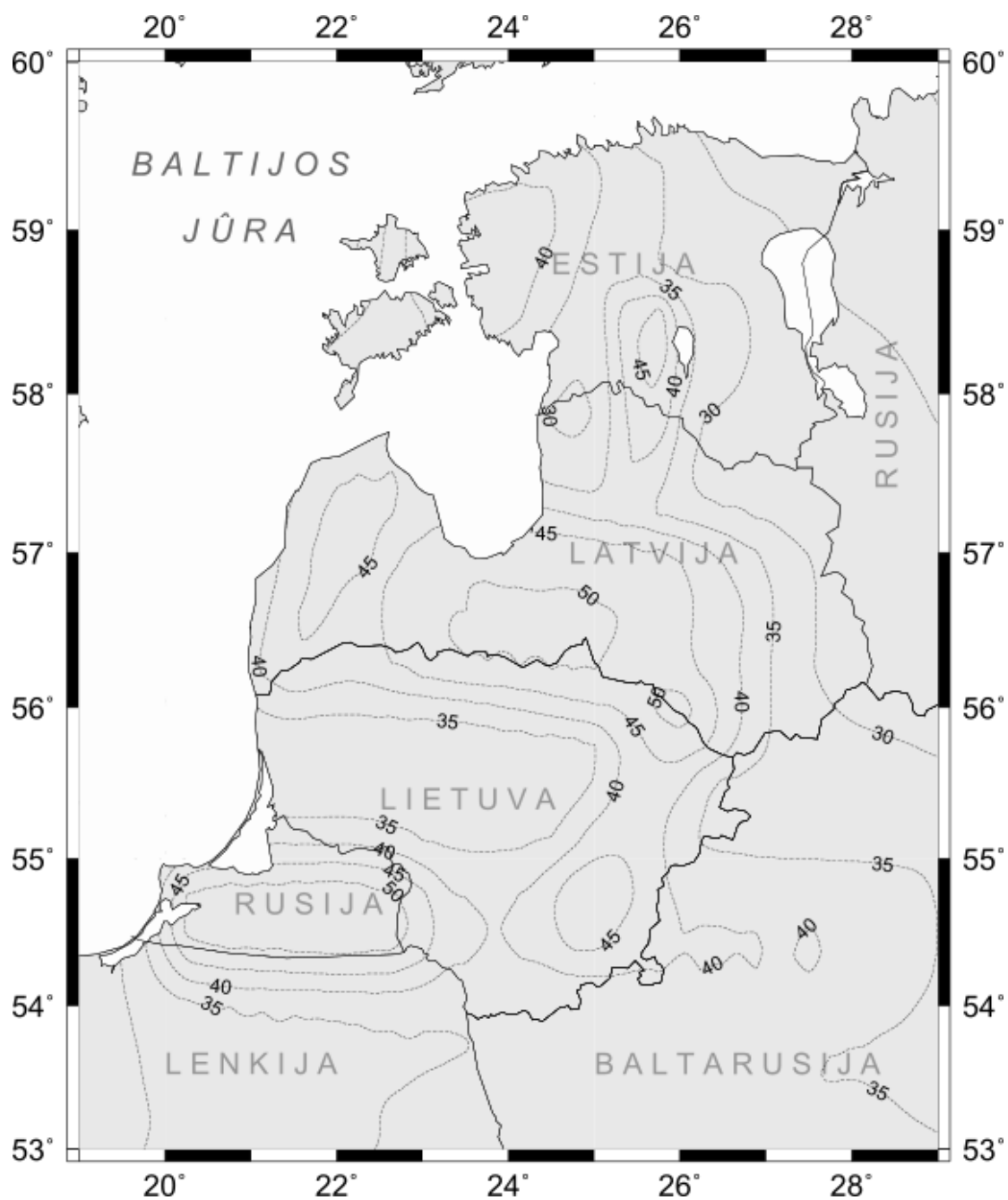
3.5.2 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tik Vrančos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kuri su 10% tikimybe gali būti viršyta per 50 metų laikotarpį (pasikartojamumo periodas 475 m.).



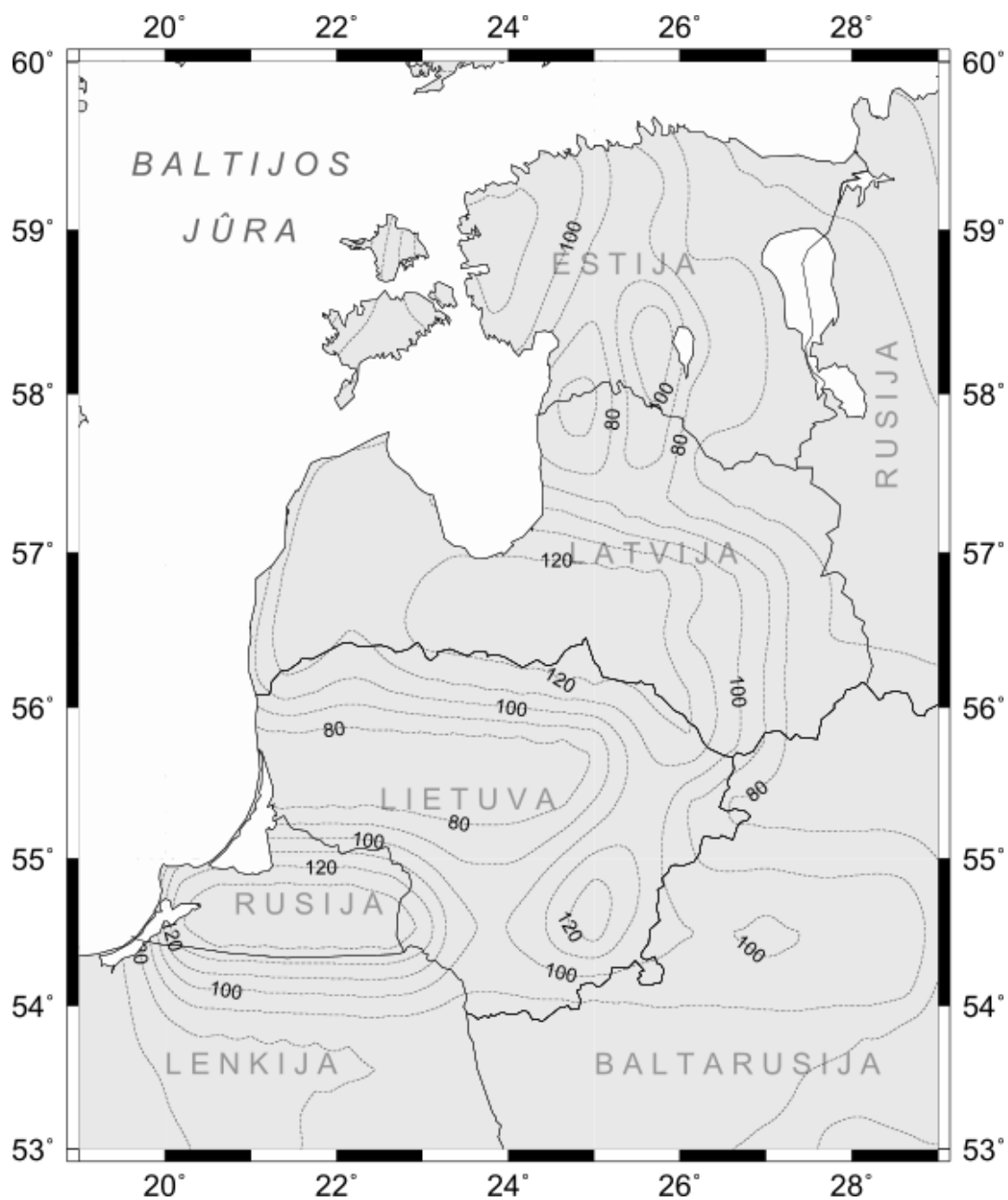
3.5.3 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tik vietinių Rytų Baltijos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kuri su 10% tikimybe gali būti viršyta per 50 metų laikotarpį (pasikartojamumo periodas 475 m.).



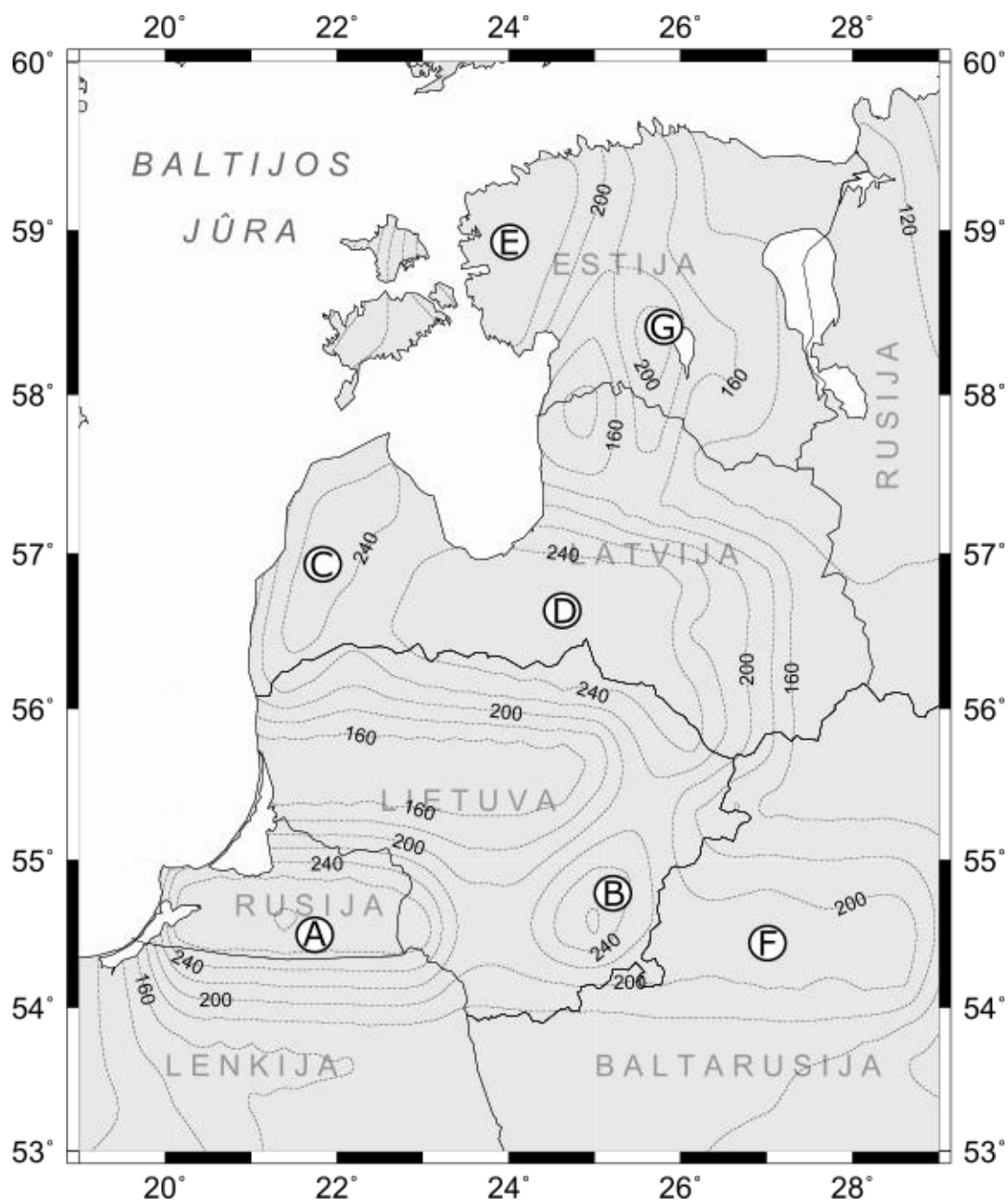
3.5.4 pav. Rytų Baltijos regiono seismo pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek Vrančos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kuri su 10% tikimybe gali būti viršyta per 50 metų laikotarpį (pasikartojamumo periodas 475 m.).



3.5.5 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek Vrančos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kurio viršijimo tikimybė yra 10^{-3} per vienus metus (pasikartojamumo periodas 1 000 m.).



3.5.6 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek Vrančos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kurio viršijimo tikimybė yra 10^{-4} per vienus metus (pasikartojamumo periodas 10 000 m.).



3.5.7 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, kai pavojingumas įtakojamas tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek Vrančos SZ. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kurio viršijimo tikimybė yra 10^{-5} per vienus metus (pasikartojamumo periodas 100 000 m.).

Grunto dalelių pagreičių spektrai

Viena iš naudotų grunto virpesių slopimo funkcijų (Ambraseys et al., 2005) aprašo ne tik maksimalių grunto dalelių virpesių pagreičių (PGA) sklidimą, bet ir kitų pagreičio spektro dažnių sklidimą bei slopimą, todėl paruoštiems seismotektoniniams modeliams buvo apskaičiuoti ir tam tikrų vietų grunto dalelių pagreičių spektrai.

Grunto dalelių pagreičių spektrų skaičiavime buvo apsiribota tik vienu seismotektoniniu modeliu A (žr. skyrelį „Rytų Baltijos regiono seismotektoninis modelis A“). Pradžioje, naudojant seismotektoninį modelį A ir Ambraseys et al. (2005) grunto virpesių slopimo priklausomybę iš keturių galimų hipotezių, buvo nustatyta, kad vidutinės PGA vertės yra gaunamos tuo atveju, jeigu naudojamas „pilno laiko“ seisminis katalogas ir b parametras lygus 0,8. Būtent toks seismotektoninis modelis su minėtais parametrais buvo naudotas grunto dalelių pagreičių skaičiavimui. Spektrai buvo skaičiuojami trimis skirtingiems atvejams: kai vertintos tik Rytų Baltijos SZ, kai vertinta tik Vrančos SZ ir kai vertintos tiek Rytų Baltijos SZ, tiek ir Vrančos SZ. Pagreičio spektro verčių viršijimo tikimybės buvo tokios pat kaip ir skaičiuojant PGA: 10^{-5} per vienerius metus (pasikartojamumo periodas 100 000 m.); 10^{-4} per vienerius metus (pasikartojamumo periodas 10 000 m.); 10^{-3} per vienerius metus (pasikartojamumo periodas 10 000 m.) ir 10^{-2} per vienerius metus (pasikartojamumo periodas 100 m.). Spektrai buvo sudaromi remiantis 13 skirtingų periodų virpesių intensyvumais: 0,05, 0,075, 0,1, 0,15, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5, 2,0 ir 2,5 s. Grunto dalelių pagreičių nagrinėjimui buvo pasirinkta uždarytos Ignalinos AE aikštelė ($55,60^\circ$ š.p. ir $26,56^\circ$ r.i.), kur planuojama statyti ir naują Visagino AE.

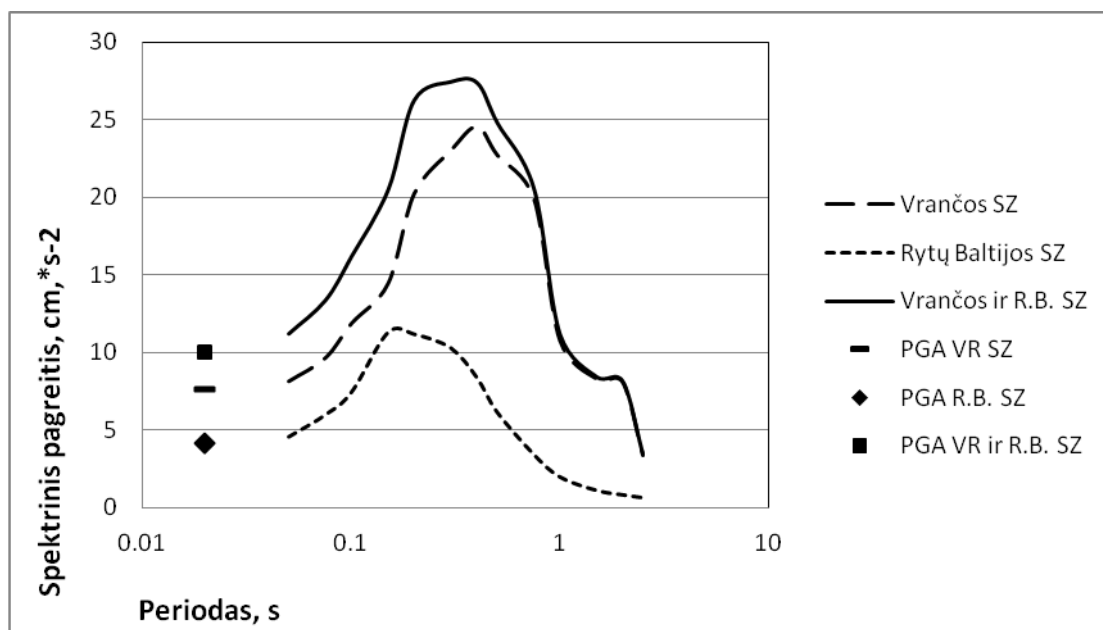
Grunto dalelių pagreičių spektrai esant 5% slopinimui Ignalinos AE aikštelei su skirtingomis viršijimo tikimybėmis yra pateikti 3.5.8, 3.5.9, 3.5.10 ir 3.5.11 pav. Analizuojant šiuos spektrus galima patvirtinti jau anksčiau padarytą išvadą, kad mažesniems pasikartojamumo periodams (100 m.) Ignalinos AE aikštelės seisminį pavojingumą stipriausiai įtakoja Vrančos SZ, o

vietinių Rytų Baltijos SZ įtaka yra nedidelė (3.5.8 pav.). Kai pasikartojamumo periodas yra 1 000 m. Ignalinos AE aikštelės seiminį pavojingumą panašiai įtakoja tiek Vrančos SZ, tiek ir Rytų Baltijos SZ, nors Vrančos SZ įtaka išlieka didesnė (3.5.9 pav.). Kai pasikartojamumo periodas yra 10 000 m. seisminį pavojingumą labiau įtakoja vietinės Rytų Baltijos SZ (3.5.10 pav.). Kai pasikartojamumo periodas yra 100 000 m. aikštelės seisminį pavojingumą pagrindinai lemia vietinės Rytų Baltijos SZ, o Vrančos SZ įtaka yra nereikšminga (3.5.11 pav.). Taip pat analizuojant grunto dalelių pagreičių spektrus (3.5.8, 3.5.9, 3.5.10 ir 3.5.11 pav.) galima pastebėti, kad Vrančos SZ įtakota spektro dalis turi vietinį maksimumą ties 0,4 s (2,5 Hz) ir tam tikrą „plato“ nuo 0,2 iki 0,75 s (nuo 5,0 iki 1,33 Hz). Vietinių Rytų Baltijos SZ įtakota spektro dalis turi aiškiai išreikštą maksimumą ties 0,2 s (5,0 Hz). Skirtingas vietinių ir užregioninių žemės drebėjimų pasireiškimas skirtinguose dažniuose gali būti aiškinamas dviem aspektais. Vietinių Rytų Baltijos SZ pikas spektre yra apspręstas didžiausių galimų magnitudžių ($M = 5,7$) SZ A1 (3.2.1 lentelė). Vrančos SZ įtakota spektro dalis yra pasislinkusi į ilgesnių periodų pusę dėl to, kad Vrančos SZ vyksta kur kas galingesni žemės drebėjimai, o pats galingiausias drebėjimas gali siekti ($M = 8,0$) (3.2.1 lentelė). Be to, spektro dalis yra pasislinkusi į ilgesnių periodų pusę, nes Vrančos SZ yra gana toli nutolusi (~1000 km) ir aukštesnio dažnio seisminių bangų energija yra išsklaidoma greičiau negu žemesnio dažnio (arba ilgesnio periodo) seisminių bangų energija joms nueinant didesnius atstumus.

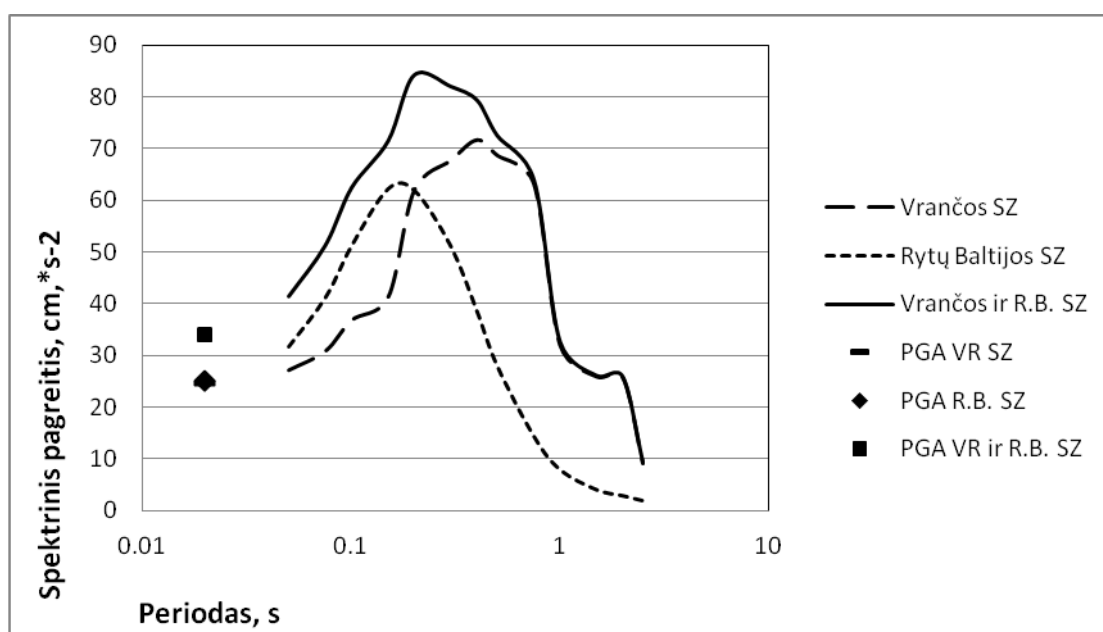
Grunto dalelių pagreičių spektrai, esant 5% slopinimui, taip pat buvo analizuoti ir kitų regione statomų AE aikštelėms – Baltarusijos AE ($54,76^\circ$ š. p. ir $26,09^\circ$ r. i.) ir Baltijos (Kaliningrado) AE ($54,94^\circ$ š. p. ir $22,16^\circ$ r. i.). Šie spektrai pateikti 3.5.12 pav. Kaip matyti iš grafikų visų trijų AE aikštelių grunto dalelių pagreičių spektrai yra panašūs. Akivaizdus spektrų panašumas gali būti aiškinamas tuo, kad visų trijų aikštelių vietinį seisminį pavojingumą įtakoja ta pati SZ A1 (3.1.8 pav.) ir panašus nuotolis iki užregioninės Vrančos SZ. 3.5.13 pav. pavaizduotas PGA žemėlapis sudarytas naudojant tik vieną seismotektoninį modelį – A, Ambraseys et al. (2005) grunto virpesių slopimo

priklausomybę, „pilno laiko“ seisminį katalogą ir b parametą, prilygintą 0,8. PGA reikšmės apskaičiuotos viršijimo tikimybei 10^{-5} per vienus metus (pasikartojamumo periodui 100 000 m.). Iš 3.5.13 pav. matyti, kad visos trys AE yra to paties lygio PGA zonoje, kas reiškia, kad ir grunto virpesių spektrai visose trijose AE aikštelėse turi būti identiški. Remiantis visų trijų aikštelių spektrų panašumu galima daryti išvadą, kad ir kituose Rytų Baltijos regiono pietinės dalies taškuose grunto dalelių spektrai bus artimi trijų AE aikštelių spektrams.

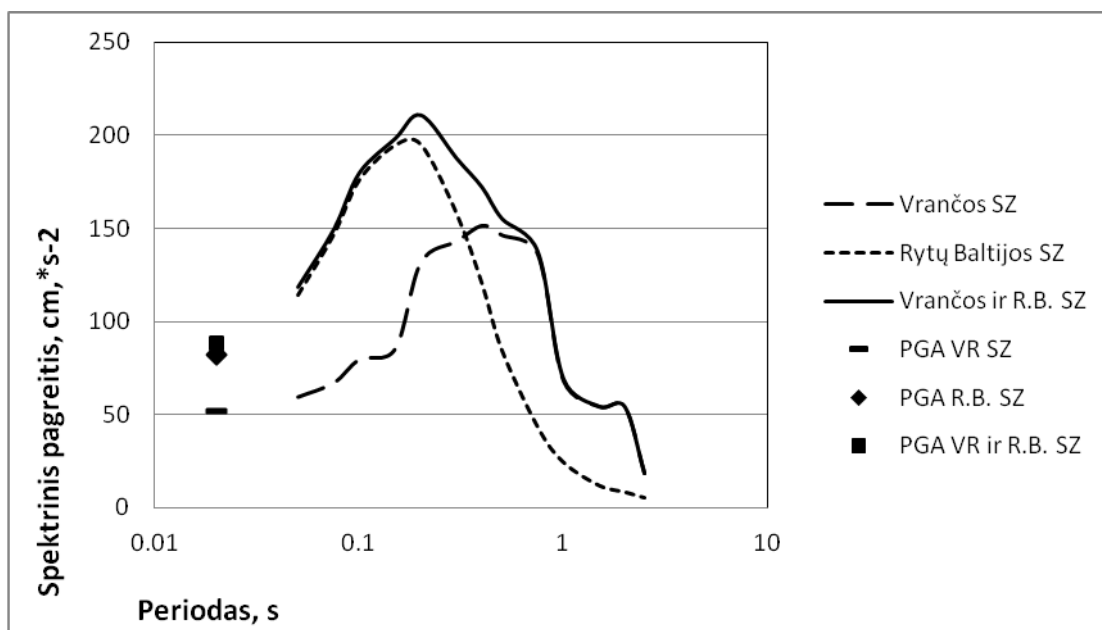
Iš daugiamečių stebėjimų, kaip pastatų konstrukcijos sąveikauja su žemės drebėjimų virpesiais, teorinių skaičiavimų bei pastatų konstrukcijų modeliavimo yra žinoma empirinė taisyklė – tam tikro pastato savitasis (rezonansinis) virpesių periodas yra lygus jo aukštingumui padalintam iš 10 (Arnold, 2006). Todėl vieno aukšto pastato savitasis virpesių periodas yra $\sim 0,1$ s, penkių aukštų – $\sim 0,5$ s, dešimties aukštų – ~ 1 s ir t.t. Atsižvelgiant į Rytų Baltijos regiono pietinės dalies grunto dalelių pagreičių spektrus, galima teigti, kad Vrančos žemės drebėjimai intensyviau veiks pastatus, turinčius nuo 2 iki 8 aukštų, o vietiniai žemės drebėjimai intensyviau turėtų paveikti 1 - 2 aukštų pastatus. Griaunamojo pobūdžio grunto pagreičių intensyvumų galima tikėtis tik kartą per 10 000 m. ar rečiau (3.5.10 ir 3.5.11 pav.), tai atsižvelgus į bendrą grunto dalelių spektro formą galima manyti, kad daugiausia nukentėtų pastatai, turintys nuo 1 iki ~ 9 aukštų.



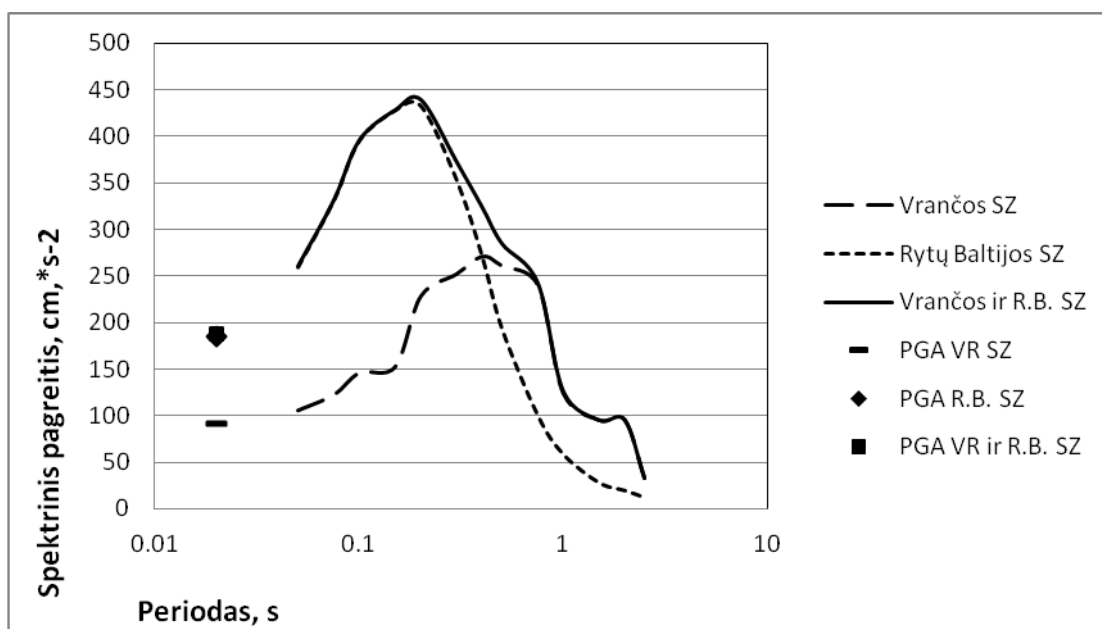
3.5.8 pav. Ignalinos AE aikštelės (55,60° š.p. ir 26,56° r.i.) grunto dalelių pagreičio spektrai esant 5% slopinimui ir PGA vertės, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-2} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 100 m.). Sutrumpinimai: VR – Vrančos, R.B. – Rytų Baltijos.



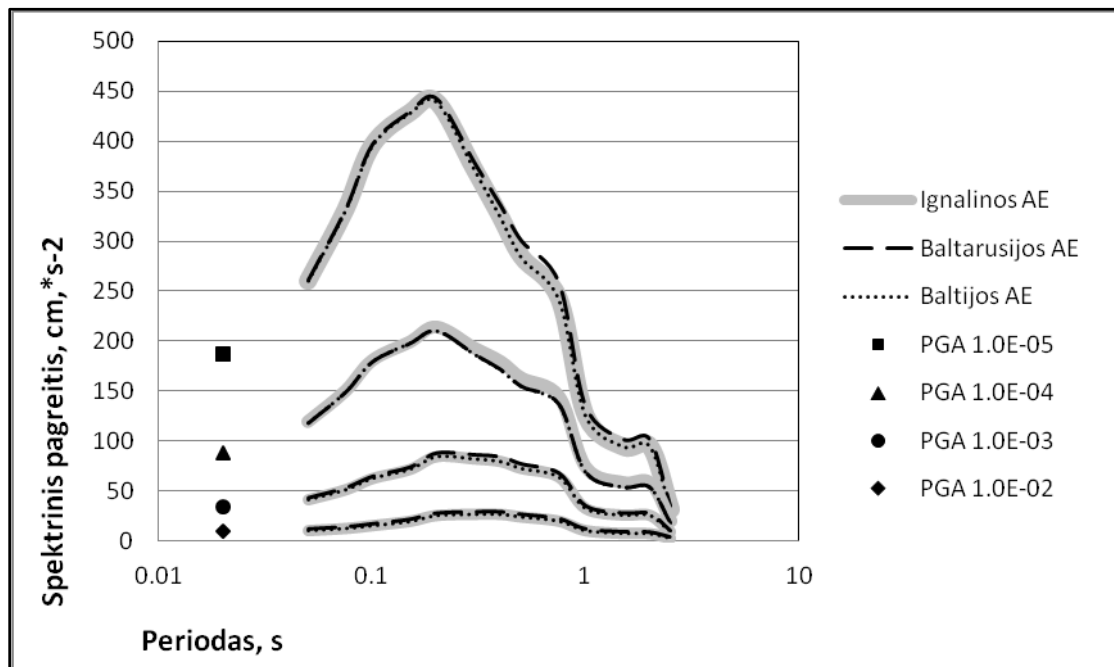
3.5.9 pav. Ignalinos AE aikštelės (55,60° š.p. ir 26,56° r.i.) grunto dalelių pagreičio spektrai esant 5% slopinimui ir PGA vertės, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-3} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 1 000 m.). Sutrumpinimai: VR – Vrančos, R.B. – Rytų Baltijos.



3.5.10 pav. Ignalinos AE aikštelės (55,60° š.p. ir 26,56° r.i.) grunto dalelių pagreičio spektrai esant 5% slopinimui ir PGA vertės, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-4} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 10 000 m.). Sutrumpinimai: VR – Vrančos, R.B. – Rytų Baltijos.



3.5.11 pav. Ignalinos AE aikštelės (55,60° š.p. ir 26,56° r.i.) grunto dalelių pagreičio spektrai esant 5% slopinimui ir PGA vertės, kurių viršijimo tikimybė yra 10^{-5} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 100 000 m.). Sutrumpinimai: VR – Vrančos, R.B. – Rytų Baltijos.



3.5.12 pav. Ignalinos AE aikštelės (55,60° š.p. ir 26,56° r.i.), Baltarusijos AE aikštelės (54,76° š. p. ir 26,09° r. i.) ir Baltijos (Kaliningrado) AE aikštelės (54,94° š. p. ir 22,16° r. i.) grunto dalelių pagreičio spektrai esant 5% slopinimui ir Ignalinos AE aikštelės PGA vertės, kurios įtakotos tiek vietinių Rytų Baltijos SZ, tiek ir Vrančėjos SZ ir kurių viršijimo tikimybės yra: 10^{-5} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 100 000 m.) – viršutinės kreivės; 10^{-4} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 10 000 m.) – antros nuo viršaus kreivės; 10^{-3} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 1 000 m.) – trečios nuo viršaus kreivės ir 10^{-2} per vienus metus (pasikartojamumo periodas – 100 m.) – apatinės kreivės.



3.5.13 pav. Rytų Baltijos regiono seisminio pavojingumo žemėlapis, vaizduojantis PGA reikšmes, kai seisminis pavojingumas buvo skaičiuotas vienam Rytų Baltijos seismotektoniniam modeliui, o būtent – modeliui A (žr. skyrelį „Rytų Baltijos regiono seismotektoninis modelis A“) ir Ambraseys et al. (2005) grunto virpesių slopimo priklausomybei, „pilno laiko“ seisminiam katalogui ir b parametras buvo prilygintas 0,8. Izolinijos parodo PGA išreikštą cm/s^2 , kurio viršijimo tikimybė yra 10^{-5} per vienerius metus (pasikartojamumo periodas 100 000 m.).

IŠVADOS

1. Atlikus 360 alternatyvius Rytų Baltijos teritorijos seisminio pavojingumo skaičiavimus, nustatyta, kad vidutinės maksimalių grunto dalelių pagreičių (PGA) vertės, esant ilgesniems pasikartojamumo periodams, labiausiai yra įtakojamos grunto virpesių slopimo funkcijų ir seismotektoninio zonavimo, o skirtingo seisminio katalogo laiko arba parametro b parinkimas vidutinės PGA vertes įtakoja mažiau.
2. Nustatyta vidutinė Rytų Baltijos regiono maksimalių grunto dalelių virpesių pagreičių (PGA) vertė yra $23,1 \pm 2,1 \text{ cm/s}^2$ pasikartojamumo periodui 475 m. Minėtam pasikartojamumui didesnę įtaką turi Vrančos žemės drebėjimai, lyginant su Rytų Baltijos regiono vietiniu seisminiu aktyvumu. 100 000 m. pasikartojamumo periodui PGA reikšmės kinta nuo ~ 140 iki $\sim 250 \text{ cm/s}^2$, o pagrindinę įtaką turi vietiniai žemės drebėjimai.
3. Išanalizavus grunto dalelių virpesių pagreičių spektrus, nustatyta, kad Vrančos seismogeninė zona (SZ) labiau įtakoja spektro intervalą nuo 0,25 iki 0,75 s (nuo 4,0 iki 1,33 Hz), o vietinių Rytų Baltijos SZ įtakota spektro dalis turi maksimumą ties 0,2 s (5,0 Hz).
4. Platforminėse, mažai seismiškai aktyviose teritorijose, siekiant įvertinti seisminį pavojingumą, galima efektyviai ir patikimai naudoti Tikimybinį seisminio pavojingumo vertinimo (TSPV) metodą. Seisminio pavojingumo vertinimo patikimumą galima įvertinti panaudojant daug alternatyvių modelių, juos sisteminant pagal loginio medžio metodiką.

LITERATŪRA

1. Abrahamson, N. A., and J. J. Boomer. 2005. Opinion Paper: Probability and Uncertainty in Seismic Hazard Analysis. *Earthquake Spectra*. Vol. 21, No. 2, p. 1–5.
2. Aizberg, R., R. Garetsky, A. Aronov, A. Karabanov and O. Safonov. 1999. Seismotectonics of Belarus and the Baltic sea region. *Technika Poszukiwan Geologicznych Geosynoptika i Geotermia*. No. 1/99, p. 28–37.
3. Ambraseys, N.N, J. Douglas, S. K. Sarma and P.M. Smit. 2005. Equation for the Estimation of Strong Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using data from Europe and Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*. No. 3, p. 1–53.
4. Arnold, C. 2006. Earthquake effects on buildings. Chapter 4. Risk management series. *Design for Earthquakes. A manual for architects*. FEMA, p. 394.
5. Atkinson, M. and D. M. Boore. 2006. Earth ground-motion prediction equations for Eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, No. 6, p. 1583–1606.
6. Baker, J. W. 2008. An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Version 1.3. Open report (https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_%282008%29_Intro_to_PSHA_v1_3.pdf), p. 72.
7. Basanavičius, J. 1906. Žemės drebėjimas Lietuvoje. *Vilniaus žinios*, Nr. 81. balandžio 18 d., 1906, p. 3.
8. Beauval, C. and O. Scoti. 2004. Quantifying sensitivities of PSHA for France to Earthquake catalog uncertainties, truncation of ground-motion variability, and magnitude limits. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 94, No. 5, p. 1579–1594.

9. Bender, B. And K. W. Campbell. 1989. A note on the selection of minimum magnitude for use in seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 79, No. 1, p. 199–204.
10. Bommer, J.J. 2002. Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy. *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 6, (43), p.43–73.
11. Brangulis, A. J. and S. Kanevs. 2002. Latvijas tektonika. Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija. Valstsgeoloģija dienests, p. 50 (in latvian).
12. Bungum, H., F. Pettenati, J. Schweitzer, L. Sirovich and J. I. Faleide. 2009. The 23 October 1904 M_S 5,4 Oslofjord earthquake: reanalysis based on macroseismic and instrumental data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 99, No. 5, p. 2836–2854.
13. Campbell, K. W., and Y. Bozorgnia (2003a). Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93, p. 314–331.
14. Campbell, K. W., and Y. Bozorgnia (2003b). Erratum to Updated nearsource ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93, p. 1413.
15. Campbell, K. W., and Y. Bozorgnia (2003c). Erratum to Updated nearsource ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93, p 1872.
16. Campbell, K. W., and Y. Bozorgnia (2004). Erratum to Updated nearsource ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration

- response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 94, p. 2417.
17. Chen, W. F. And C. Scawthorn. 2003. *Earthquake engineering handbook*. CRC Press. ISBN 0-8493-0068-1, p. 683.
 18. Cornell, C. A. 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 58, p. 1583–1606.
 19. dePolo, C. M. and D. B. Slemmons, 1990. Estimation of earthquake size for seismic hazards. In *Neotectonics in Earthquake Evaluation* (E. L. Krinitsky and D. B. Slemmons, Eds.), *Geol. Soc. Am., Rev. Eng. Geol.* Vol. 8, p. 1–28.
 20. Doss, B. 1898. Übersicht und Natur der in den Ostseeprovinzen vorgekommen Erdbeben. *Korresp. Bl. Naturf. Ver. Riga.*, t, 40, p. 147–162.
 21. Doss, B. 1905a. Über ein unbeachtet gebliebenes Beben in Estland. – *Korresp. Bl. Naturf. Ver. Riga*, t,48, p. 121–138.
 22. Doss, B. 1905b. Das skandinavische Erdbeben von 23. Oktober 1904 in seinen Wirkungen innerhalb der russischen Ostseeprovinzen und des Gouvernements Kowno. – *Korresp. Bl. Naturf. Ver. Riga*, t,48, p. 249–301 (with maps).
 23. Doss, B. 1909a. Die historische beglaubigten Einsturzbeben und seismisch-akustischen phänomene der russischen Ostseeprovinzen. Sonderabdruck aus *Gerlands und Rudolphs Beiträgen zur Geophysik Bd. X, Heft 1.* p.1–124.
 24. Doss, B. 1909b. Die Erdstöße in der Ostseeprovinzen im Dezember 1908 und Anfang 1909 (*Korespondenzbl. Bd. S.*, p. 73–108; mit Situationskizzen)
 25. Doss, B. 1911. Über einige bisher unbekannt gebliebene ältere Erdbeben in der Ostseeprovinzen. – *Korresp. Bl. Naturf. Ver. Riga*,
 26. Doss, B. 1915. Seismische Ereignisse in den Ostseeprovinzen vom Juni 1910 bis Ende 1912. *Izv. Postojanoi centralnoj seismicheskoi komissii.* 6, Petrograd, p. 25–32 (in Russian).

27. Duisburgietis, P. 1985. Prūsijos žemės kronika. Vilnius, p. 498.
28. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004. European committee for standardization, p. 229.
29. Gadeikis, S., Dundulis K., Žaržojus G., Gadeikytė S., Urbaitis D., Gribulis D., Šliaupa S. 2012. Correlation of shear-wave velocities and cone resistance of quaternary glacial sandy soils defined by Seismic Cone Penetration Test (SCPT). *Journal of Vibroengineering*. Vol. 14: 715–720.
30. Gadeikis, S., Dundulis K., Žaržojus G., Gadeikytė S., Urbaitis D., Gribulis D., Šliaupa S., Gabrielaitis L. 2013. Correlation between shear wave velocity and cone resistance of Quaternary glacial clayey soils defined by Seismic Cone Penetration Test (SCPT), Lithuania. *Journal of vibroengineering*. Vol. 15, issue. 2, p. 992–998.
31. Giardini, D., M. J. Jimenez, and G. Grunthal. 2003. European-Mediterranean Seismic Hazard Map. Scale 1:5 000 000. European Seismological Commission.
32. Giardini, D. G. Grunthal, K. Shedlock and P. Zhan. 1999. The GSHAP Global Seismic Hazard Map, *Annali di Geofisica*. Vol. 42, N. 6, p. 1125–1230.
33. Gregersen, S. and P.W. Basham. 1989. Summary, Conclusions and Recommendations, in *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, p. 1–6.
34. Gregersen, S., P. Wiejacz, W. Debski, B. Domanski, B. Assinovskaya, B. Guterch, P. Mäntyniemi, V.G. Nikulin, A. Pacesa, V. Puura, A.G. Aronov, T.I. Aronova, G. Grunthal, E.S. Husebye and S. Sliupa, 2007. The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. No. 164, p. 63–74.
35. Grigelis, A., Editor-in-chief, Compiled by A. Sliupa, Lberzin, K. Kajak, J. Straume. 1981. Neotectonic map of the Soviet Baltic Republics, Scale 1:500 000.

36. Grünthal, and the GSHAP Region 3 Working Group, 1999. Seismic hazard assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3. *Annali di Geofisica*. Vol. 42, No. 6, p. 999–1011.
37. Grünthal, G. and Strohmeier D. 1992. The Recent Crustal Field in Central Europe Trajectories and Finite-element Modelling, *J. Geophys. Res.* 97, p. 11805–11820.
38. Grünthal, G. (Ed.). 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) European Seismological Commission, sub commission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales. Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15, Luxembourg.
39. Grünthal, G. and P. Riedel, 2007. Zwei angebliche Erdbeben in den Jahren 1303 und 1328 im heutigen Raum Kaliningrad. *Z. geol. Wiss.*, Berlin 35. No. 3, (1), p. 157–163.
40. Grünthal, G., Wahlstrom R. and Stromeier D. 2009. The unified catalogue of earthquakes in central, northern and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *Journal of Seismology* 13(4), p. 517–541.
41. Gudelis, V. 1958. Ar būta Lietuvoje žemės drebėjimų? *Mokslas ir gyvenimas*. Nr. 1, p. 17–20.
42. Guidoboni, E., A. Comastri. 1997. The large earthquake of 8 August 1303 in Crete: seismic scenario and tsunami in the Miditeranian area. *Journal of Seismology*. No. 1, p. 55–72.
43. Guterch, B. 2009. Sejsmicznosc Polski w swietle danych historycznych. *Przegląd Geologiczny*. Vol. 57, no. 6, p. 513–520.
44. Havskov, J. and L. Ottemöller. 1999. SeisAn Earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, Vol. 70.
45. Ilginytė, V. 1998. Lietuvos seismotektoninis aktyvumas (daktaro disertacija). Vilnius: Geologijos ir geografijos institutas.

46. Ilginytė, V. ir Šalavėjus, S., 1994. Seismometriniai matavimai Lietuvoje. Kn. Gelmių geologinio tyrimo, naudojimo ir apsaugos problemos Lietuvoje. Vilnius, Geologijos institutas, p. 40–41.
47. International Atomic Energy Agency. 2003. Seismic design and qualification for nuclear power plants. Safety guide. Safety standards series No. NS-G-1.6. SN 1020–525X.
48. Janutytė, I., E. Kozlovskaya, G. Motuza and PASSEQ working group. 2012. Study of local seismic events in Lithuania and adjacent areas using data from the PASSEQ experiment. *Pure and Applied Geophysics*. Vol. 170, Issue 5, p.797–814.
49. Jimenez, M. J., D. Giardini, G. Grünthal. 2003. The ESC-SESAME Unified Hazard Model for the European-Mediterranean region. *EMSC/CSEM Newsletter*. No. 19, p. 2–4.
50. Kano, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara and Y. Fukushima. 2006. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 96, No. 3, p 879–897.
51. Kijko, A. 2011. Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (Extended version of contribution by A. Kijko, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Harsh Gupta (Ed.), Springer, 2011), p 27.
52. Kristapavičius, H., 1964. Žemės drebėjimai Lietuvoje. *Mūsų gamta*. Nr. 4, p. 20–21.
53. Kondraskaya, N.V. and N. V Shebalin - editors in chief. 1982. New Catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1977. Academy of Sciences of USSR. Boulder, USA, p. 608.
54. Kovachev, S. A. 2008. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. Vol. 44. No. 9, p. 706–716.
55. Lagerbäck, R. 1979. Neotectonic structures in northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 100, p. 263–269.
56. Latvis, H. ir H. Vartbergė. 1991. *Livonijos kronikos*. Vilnius. 1991, p. 223.

57. Lazauskienė, J., A. Pačėsa and J. Satkūnas. 2012. Seismotectonic and seismic hazard maps of Lithuania – recent implications of intracratonic seismicity in the Eastern Baltic Region. *Geologija*. Vol. 54. No. 1 (77), p. 1–9.
58. Lundqvist, J. and Lagerbäck, R. 1976. The Pärve Fault: A late-glacial fault in the Precambrian of Swedish Lapland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 98, p. 45–51.
59. Mantiniemi, P., V. I. Marza, A. Kijko and P. Retief. 2003. A new probabilistic seismic hazard analysis for the Vrancea (Romania) seismogenic zone. *Natural Hazards*. No 29, p. 371–385.
60. Mantiniemi, P., A. Kijko and P. Retief. 2001. Parametric-historical procedure for seismic hazard assessment and its application to northern Europe. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. Vol. 42. No., p. 1–2, p. 41–55.
61. McGuire, R.K. 2001. Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 21, Issue 5, p. 377-384.
62. McGuire, R. K. 1976. FORTRAN computer program for seismic risk analysis. U.S. Geol. Surv. Open-file Report 76: p.1-67.
63. Mohamed, A. E. A., M. El-Hadidy, A. Deif and K. A. Elenean. 2012. Seismic hazard studies in Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. No 1, p. 119–140.
64. Nicola, A. P., A. Piatanesi, G. Valensise and E. Boschi. 2009. The 28 December 1908 Messina Straits Earthquake (M_w=7.1): A Great Earthquake throughout a Century of Seismology. *Seismological research letters*. Vol. 80. No. 2, p. 37–41.
65. Nikonov, A.A. and H. Sildvee. 1991. Historical earthquakes in Estonia and their seismotectonic position. *Geopysica*. Vol. 27. No. 1–2, p. 79–93.

66. Nikulin, V. 2011. Assessment of the seismic hazard in Latvia. Version of 2007 year. Scientific Journal of Riga Technical University Material Science and Applied Chemistry. Vol. 24, p. 110–115.
67. Okal, E. A. and J. R. Sweet. 2007. Frequency-size distribution for intraplate earthquakes. The Geological Society of America. Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard and Policy Issues. Special paper 425, p. 59–71.
68. Oncescu, M. C., V. I. Marza, M. Rizrescu and M. Popa. 1999. The Romanian earthquake catalogue between 984-1997, in F. Wenxel et al. (eds.), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, Kluwer, Dordrech, p. 43–47.
69. Ordaz, F., F. Martinelli, V. D'Amico and C. Meletti. 2013. CRISIS2008: a flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assesment. Vol. 84. No. 3, p. 495.
70. Ottemöller, L., P. Voss, and J. Havskov. 2012. SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX, Version 9.1, Univ. of Bergen, Bergen, Norway, p. 372.
71. Pačėsa, A. 2001. Seismologinis monitoringas Lietuvoje. Geologijos akiračiai. Nr. 4 (44), p. 31–36.
72. Pačėsa, A., S. Šliaupa ir J. Lazauskienė. 2005. Kaliningrado žemės drebėjimų makroseisminiai tyrimai ir seismologijos perspektyvos Lietuvoje. Geologijos akiračiai. Nr. 2 (58), p. 46–53.
73. Pačėsa, A. 2011. Seismologiniai stebėjimai Lietuvoje. BALTICA, Vol. 24, Special Issue, p. 123–126.
74. Pačėsa, A. ir I. Janutytė, 2011. Ignalinos AE seisminio monitoringo sistema 1999–2009 metais. Geologijos akiračiai. Nr. 1–2, p. 29–33.
75. Pačėsa, A. and S. Šliaupa. 2011. Seismic activity and earthquake catalogue of the East Baltic region. Geologija. Vol. 53. No.3 (75), p. 134–146.
76. Pačėsa, A., I. Janutytė, J. Lazauskienė ir J. Čyžienė. Seismologiniai tyrimai 2012 m. 2013. Lietuvos geologijos tarnybos 2012 metų veiklos

- rezultatai: [metinė ataskaita] = Lithuanian Geological Survey: Annual Report 2012 / ats. red. J. Satkūnas; Lietuvos geologijos tarnyba, p. 134, iliustr. – liet., angl. – ISSN 1392-7272.
77. Saari, J. 2000. Seismic activity parameters of the Finnish potential repository sites. Posiva OY. Report code: POSIVA 2000–13. ISBN 951-652-099-5. 2000, p. 31.
 78. Sakalauskas, K, 1977. Seisminis aktyvumas Lietuvoje. Mokslas ir technika. Nr. 11, p. 54–57.
 79. Shenk, V., Z. Schenkova, P. Kottnauer, B. Guterch and P. Labak. 2000. Earthquake Hazard for the Czech republic, Poland and Slovakia – Contribution to the ILC/IASPEI Global seismic Hazard Assessment Program. Natural Hazards. Vol.21, p. 331–345.
 80. Slunga, R. 1979. Source mechanism of a Baltic earthquake inferred from surface-wave recordings. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 69. No. 6, p. 1931–1964.
 81. Stirpeika, A. 1999. Tectonic Evolution of the Baltic Syncline and Local Structures in the South Baltic Region with Respect to their Petroleum Potential: Monography. Scientific editors: J. Laškovas, A. Šliaupa; Geological Survey of Lithuania. Vilnius. 1999. p. 112 + 3 maps.
 82. Suveizdis, P., V. Ilginytė, S. Šalavėjus ir V. Bernadskis. 1994. Seismic-tectonic activity of Middle Lithuania. Geologija. No. 16, p. 56–60.
 83. Suveizdis, P. 1979. Tectonic map of Baltics in Suveizdis, P. – editor in chief. 1979. *Tektonika Pribaltiki* [Tectonics of Baltics]. Vilnius. „Mokslas“, p. 90.
 84. Šliaupa, S. and P. Hoth. 2011. Geological evolution and resources of the Baltic Sea Area from the Precambrian to the Quaternary. The Baltic Sea Basin. Berlin: Springer, p. 13-51.
 85. Šliaupa, S. and Zakarevičius A., 2000. Recent stress pattern in eastern part of the Baltic basin, Lithuania. Europrobe (TESZ) and PACE Workshop Abstracts Volume. Warsaw, p. 79.

86. Šliaupa, S. 2013. Modelling of the ground motion of the maximum probable earthquake and its impact on buildings, Vilnius city. *Journal of vibroengineering*. Vol. 15, issue 2, p. 532–543.
87. Trojanski, J., B. Plesiewicz and J. Wisziowski. 2015. Seismic Monitoring of Poland – Description and Results of Temporary Seismic Project with Mobile Seismic Network. *Acta Geophysica*. Vol. 63. No. 1, p. 17–44.
88. Varpasuo, P., J. Saari and Y. Nikkari. 2001. Seismic hazard and ground motion for Leningrad NPP site. *Transactions, SMiRT 16*, Washington DC. Paper #1342, p. 1–8.
89. Wahlström, R., and G. Grünthal. 2001. Probabilistic hazard assessment (horizontal PGA) for Fennoscandia using the logic tree approach for regionalization and nonregionalization models. *Seismological Research Letters*. Vol. 72. No. 1, p. 33–45.
90. Wahlström, R., G. Grünthal. 2000. Probabilistic seismic hazard assessment (horizontal PGA) for Sweden, Finland and Denmark using different logic tree approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. No. 20, p. 45–58.
91. Wahlström, R. 1990. A catalogue of earthquakes in Sweden in 1375–1890. *Geologiska Foreningen i Stockholm forhandlingar: GFF*. Vol. 112. No. 3, p. 215–225.
92. Wiejacz, P. and W. Debski. 2001. New observations of Gulf of Gdansk seismic events. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. No 123, p. 233-245.
93. Zakarevičius, A., E. Parseliunas, S. Šliaupa, A. Stanionis, R. Stephenson. 2008. Horizontal deformations of the earth's crust in the Baltic region from GPS data. *The 7th International conference "Environmental engineering": selected papers*. May 22-23, 2008 Vilnius, Lithuania. Vol. 3, p. 1503–1507.
94. Žalūdienė, G. ir V. Katinas. 2013. Istorinių seisminių įvykių Lietuvos teritorijoje makroseisminis apibūdinimas. *Geologijos akiračiai*. Nr. 4 (92), p.18–26.

95. Zhao, J. X., J.Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H. Thio, P. G. Samerville, Y. Fukushima and Y. Fukushima. 2006. Attenuation relations of strong motion in Japan using site clasification based on predominant period. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 96, No. 3, p 898–913.
96. Авотиня, И.Я, А.М. Боборыкин, А.П. Емевьянов, Х. Х. Сильдвээ. 1988. Катаког исторических землятресений Белорусии и Прибалтики. Сейсмологический бюллетень сейсмических станций “Минск” (Плещеницы) и “Нароч” за 1984 г. ОНТИИ, Минск. 1988, с. 126–135.
97. Аносов, Г. И., Б., Я. Чугаевич. 2010. О сейсмическом потенциале Калининградской сейсмической зоны. Горный журнал. No. 3, с. 37–44.
98. Ассиновская, Б. А., Г. Ф. Кофф и В. Ф. Котлов – авторы составители. 2008. Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, с. 170.
99. Аронова, Т. И. 2007. 6.2 Исторические и современные ощутимые землетрясения. *in* Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики восточно-Европейской платформы. Кн. 1: Землетрясения. Шаров Н. В., А. А. Маловичко, Ю. К. Щукин – редакторы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, с. 324–350. ISBN 978-5-9274-0278-6.
100. Боборыкин, А.М., Р.Г. Гарецкий, А.П. Емевьянов, Х. Х. Сильдвээ, П. И. Сувейздис. 1993. Землятресения Беларуси и Прибалтики. Современное состояние сейсмических наблюдений и их обобщений. Академия Наук Беларуси. Минск, с. 29–39.
101. Борисов, Б. А., Рейснер Г. И. 1976. Сеймотектонический прогноз максимальной магнитуды землятресений Карпатского региона. Изв. АН СССР. Физика Земли. No 5, с. 21–31.
102. Гарецкий, Р.Г., Аронов А.Г., Айзберг Р.Е., Карабанов А.К., Сафронов О.Н. 1997. Общее сейсмическое районирование

- Белорусско-Прибалтийского региона. / Доклады АН Беларуси, том 41, No. 4, с. 98–102.
103. Гарецкий, Р. Г. и С. А. Несмеянов - науч. редакторы. 2009. Сейсмоструктура плит древних платформ в области четвертичного оледенения. Институт Геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН Беларуси. РОСАТОМ. ISBN 978-5-212-01091-7. Москва, “Книга и Бизнес”, с. 226.
 104. Кендзера, А. В., Пронишин Р. С., Вербицкий С. Т., Бень Я. А. 1995. Прогнозирование максимальных цотрясений в Минске при румынских землетрясениях. Геодинамические исследования в Украине. Киев: ИГФ НАН Украины, с. 24–36.
 105. Кострюк, О. 1997. Сагалова Е., Рубенска І. И гр. Каталог землетрусів Карпатського регіону за 1091 -1990 рои. Праці НТШ. Львів: НТШ, с. 121–137.
 106. Кутас, В. В., Руденская И. М., Калитова И. А. 2001. Повторяемость карпатских землетресений. Геофиз. Журн. Том. 4. No. 4., с. 46–54.
 107. Никонов, А. А. 2006. Землетресения... Прошлое, современность, прогноз. Издательство “КомКнига”. Москва, с. 72–81. ISBN5-484-00535-3.
 108. Никонов, А. А. и Сильдвээ Х. Х. 1987. Исторические землетрясения в Эстонии и их сеймоструктурная позиция. Известия АН ЭССР. Геология, с. 23–29.
 109. Ризниченко, Ю. В., Друмя А. В., Степаненко Н. Я., Симолова Н. А. 1980. Сейсмичность и сейсмическая опасность Карпатского региона. Карпатское землетресение 4 марта 1977 г. И его последствия. М: Наука, с. 46–85.
 110. Сагалова, Е. А. 1987. Реализация долговременного прогноза в зоне Вранча. Геофиз. Журн. Том. 9. No. 6, с. 84–94.
 111. Соллогуб, В. Б. и др. 1985. Строение литосферы вдоль геотраверса V на основании комплексных геолого-геофизических данных. Геофиз. Журн. No 4, с. 3–8.

112. Сувейздис, П. – отв. ред. 1979. Тектоника Прибалтики. Ред. коллегия Григелис А., Йодказис В. АН Лит. ССР, управление геологии при Совете Министров ЛССР, ЛИТНИГР и др. Вильнюс, с. 89.
113. Уломов, В. И. и Л. С. Шумилина. 1999. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. 1999. Министерство науки и технологий Рососсийской Федерации, Российская Академия Наук. Объединенный институт физики земли им. О. Ю. Шмидта, с. 37.
114. Уломов, В. И., К. Н. Акатова, Н. С. Медведева. 2008. Физика земли. No.9, с. 3–19.
115. Чекунов, А. В. 1986. Сейсмический пайон Вранча – тектонический аспект. Доп. Ан УССП, сеп. Б. No. 5, с. 21–56.
116. Шаров, Н. В., А. А. Маловичко, Ю. К. Щукин – редакторы. 2007. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики восточно-Европейской платформы. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, с. 381. ISBN 978-5-9274-0278-6.