

UDK 528.389

ŽEMĖS PLUTOS HORIZONTALIŲJU JUDESIŲ TYRIMAS ANSYS PROGRAMA

Algimantas Zakarevičius, Arminas Stanionis

*Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva
el. paštas: gkk@ap.vtu.lt*

Įteikta 2004 09 26, priimta 2005 01 03

Santrauka. Žemės plutos horizontaliesiems judesiams ir tektoninių įtampų kaitai modeliuoti pagal geodezinių matavimų duomenis baigtinių elementų metodu taikyta *Ansys* programa. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje. Gauti detalūs horizontaliųjų deformacijų parametrai bei apskaičiuoti nauji tektoninių įtampų priaugių rodikliai – svarbiausieji įtempimų priaugiai, nustatytos jų kryptys. Remiantis tyrimo rezultatais bei jų analizės duomenimis, daroma išvada, kad horizontaliesiems Žemės plutos judesiams modeliuoti gali būti taikoma *Ansys* programa. Šios programos taikymo privalumas, palyginti su įprastiniais plačiai taikomais geodezinių tyrimų būdais, yra ne tik tai, kad galima detalizuoti Žemės plutos deformacijų sklaidą, bet ir gauti naujos informacijos apie tektoninių įtampų kaitą.

Raktažodžiai: baigtinių elementų metodas, GPS, geodinaminiai procesai, tektoninės įtampos, Žemės plutos deformacijos.

1. Įvadas

Tiriant dabartinius horizontaliuosius Žemės plutos judesius geodeziniais metodais, pagal kartotinių matavimų duomenis nustatomi geodezinių punktų poslinkiai ir sutapatunami su Žemės plutos poslinkiais [1–5]. Geodezinių punktų poslinkiai randami pagal koordinacių pokyčius per laiko tarpą tarp geodezinių matavimų, taigi Žemės plutos poslinkių skaitinės reikšmės nustatomos tik pavieniuose retai išdėstytuose taškuose. Sudarant Žemės plutos deformacijų bei įtampų modelius, kituose taškuose deformacijų bei įtampų reikšmės apskaičiuojamos interpoliavimo būdu, dažniausiai taikant tiesinio interpoliavimo procedūras. Toks horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei įtampų nustatymo būdas turi nemažai trūkumų. Išmatuotos geodezinių punktų poslinkių reikšmės ir kryptys priklauso nuo pradinių taškų, kurie skaičiuojant poslinkius laikomi tvirtais, pasirinkimo. Apskaičiuojant Žemės plutos judesių reikšmes ne geodeziniuose punktuose geometrinio interpoliavimo būdu neįvertinamos mechaninės bei struktūrinės deformuojamojo kūno savybės, t. y. mechaninis deformacijų modelis.

Pagal mechanikos dėsnius Žemės plutos judesiai susiję su jos įtampų kaita. Todėl tarp Žemės plutos judesių ir įtampų yra funkcinis ryšys [6–13]. Kadangi dabartiniai Žemės plutos judesiai yra ilgą periodą vykstančių tektoninių Žemės plutos deformacijų tąsa, tai geodeziniais metodais nustatytos deformacijos yra ilgo periodo deformacijų pokytis per tam tikrą laikotarpį. Dėl šios priežasties pagal geodezinių matavimų rezultatus, atsižvelgiant į sąsajas tarp deformacijų ir įtampų, galima apskaičiuoti tik įtampų pokyčius, o ne absoliučiąsias

įtampų reikšmes. Tačiau Žemės plutos judesius siekiant nustatyti tiesiogiai – sulyginant per skirtingus matavimų ciklus gautas koordinatas, galimas rezultatų nevienareikšmiškumas. Dėl tos priežasties pagal geodezinių punktų poslinkius apskaičiuotų Žemės plutos įtampų pokyčiai taip pat bus nevienareikšmiai.

Todėl pagal geodezinių matavimų rezultatus modeliuojant horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas ir Žemės plutos įtampų pokyčius reikia taikyti koordinacių sistemų atžvilgiu invariantiškus, t. y. nuo pradinių taškų pasirinkimo, skaičiuojant geodezinių punktų poslinkius, nepriklausančius analizės metodus. Vienas iš tokių būdų yra tenzorinė Žemės plutos deformacijų ir įtampų analizė [6, 7, 11–13].

Sudarant Žemės plutos deformacijų ir su jomis susijusių Žemės plutos įtampų kaitos modelius, tikslinga derinti tenzorinę analizę su mechaniniais fizinių kūnų deformacijų modeliais. Toks derinimas nagrinėjamoje teritorijoje įmanomas modeliuojant deformacijų ir įtampų kaitą *Ansys* programa [6] bei įvertinant jų reikšmes mechanikoje modeliavimo uždaviniams spręsti plačiai taikomu baigtinių elementų metodu [10, 13, 14]. Taip gaunami detalūs Žemės plutos deformacijų ir įtampų kaitos modeliai, geriau atspindintys Žemės plutos deformacijų sąsajas su teritorijos tektonine sandara nei deformacijų reikšmės, apskaičiuotos tik taškuose, sutampančiuose su geodeziniais punktais.

Šio darbo tikslas – išnagrinėti tenzorinės analizės ir baigtinių elementų metodo taikymą horizontaliosioms Žemės plutos deformacijoms ir Žemės plutos įtampų kaitai modeliuoti *Ansys* programa pagal geodezinių matavimų duomenis.

Eksperimentiniai skaičiavimai atlikti Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje,

nes regionas išsiskiria savita tektonine sandara, t. y. nustatyta stambių tektoninių struktūrų sandūros zona bei stebimos intensyvos magnetinio lauko anomalijos.

Ignalinos atominės elektrinės regione pagal gruntinių punktų koordinatų pokyčius, laikant, kad plokštuminės deformacijos yra vienalyčio bei izotropinio pobūdžio, apskaičiuota: modelio poslinkiai tarpiniuose taškuose, santykinės linijinės bei šlyties horizontaliosios deformacijos, normalinių bei tangentinių tektoninių įtampų bei svarbiausiųjų įtampų prieaugiai. Atsižvelgiant į fizinę sąsają tarp horizontaliųjų deformacijų bei įtampų, gauti nauji rezultatai, kuriais remiantis įvertinta Ignalinos atominės elektrinės regiono tektoninės sandaros ir dabartinių geodinaminių procesų sąsajos. Nustatyta, kad Ignalinos atominės elektrinės rajone horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų bei tektoninių įtampų struktūra siejasi su tektoniniais teritorijos ypatumais, t. y. teritorija geodinaminiu požiūriu yra aktyvi ir dabar.

2. Plokštuminių deformacijų skaičiavimo metodika

Horizontalieji Žemės plutos judesiai nustatomi tiriant pagal kartotinių tikslųjų geodezinių matavimų duomenis apskaičiuotus geodezinių tinklų punktų poslinkius, įvykusius per laiką tarp pakartotų matavimų. Šiuo metu tyrimams atlikti plačiai taikomi GPS (globalinės padėties sistemos) matavimai [1, 15–18]. Horizontaliuosius Žemės plutos judesius galima nustatyti pagal identiškų punktų koordinatų skirtumus [1, 4, 10, 18–23].

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

Žemės plutos horizontaliąsias deformacijas galima aprašyti antrojo rango tenzoriumi. Jį sudarytų simetrinė ir nesimetrinė dalys [1–3, 24–27]:

$$\|T\| = \|A\| + \|W\|, \quad (1)$$

$$\|A\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) \end{vmatrix}, \quad (2)$$

$$\|W\| = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\omega_{xy} \\ \frac{1}{2}\omega_{yx} & 0 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) & 0 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

čia

$$\begin{aligned} u &= \Delta x = u(x, y), \\ v &= \Delta y = v(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

u , v – koordinatų poslinkiai, išreikšti tiesinėmis koordinatų funkcijomis Dekarto koordinatų sistemoje, ε_{xx} , ε_{yy} – santykinės linijinės deformacijos, ε_{xy} – santykinės šlyties deformacijos; ω_{xy} , ω_{yx} – baigtinio elemento posūkiai.

Geometrinės (Koši) lygtis, nusakančias sąsajas tarp Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų bei poslinkių, galima užrašyti operatorine-matricine forma [7, 14, 26]:

$$\varepsilon = \nabla^T \cdot \mathbf{u}, \quad (5)$$

čia

$$\nabla^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = [u \quad v]^T, \quad (7)$$

ε – horizontaliųjų deformacijų vektorius, ∇^T – transponuotasis Hamiltono operatorius, \mathbf{u} – poslinkių vektorius.

Plokščiojo įtempimų būvio deformacijos $\varepsilon_{xz} = 0$, $\varepsilon_{yz} = 0$, $\varepsilon_{zz} \neq 0$ [11]:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}), \quad (8)$$

čia ν – Puasono koeficientas (0,25), ε_{xz} , ε_{yz} – santykinės šlyties deformacijos, ε_{zz} – santykinė linijinė deformacija.

Remiantis bendroju Huko dėsniumi (8) formulę galima užrašyti (deformaciją ε_{zz} išreiškus normaliniais įtempiais) [7]:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \quad (9)$$

čia E – tamprumo modulis $\left(7 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$, σ_{xx} , σ_{yy} – normaliniai įtempiai.

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

3. Tektoninių įtampų skaičiavimo metodika

Tektoninėms įtampoms horizontaliojoje plokštumoje skaičiuoti taikytas atvirkštinis Huko dėsnis. Fizinis dėsnis, įtempimus išreiškiant deformacijomis, matricine forma užrašomas (esant plokštuminiam įtempimų būviui, įtempimai: $\sigma_{xz} = 0$, $\sigma_{yz} = 0$, $\sigma_{zz} = 0$) [10, 13, 14]:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

čia

$$\sigma = \left[\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{xy} \right]^T, \quad (11)$$

$$K = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \left[\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{xy} \right]^T, \quad (13)$$

σ – tektoninių įtampų vektorius, K – standumo matrica, ε – horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų vektorius, σ_{zz} – normalinis įtempis, σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} – tangentiniai įtempiai.

Tampriojo kūno mechaniniai rodikliai susiję [7, 14]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (14)$$

čia G – šlyties modulis. Mechaniniai rodikliai (G , E , ν) nepriklauso nei nuo kūno taško koordinatė (vienalytiškumo prielaida), nei nuo pasirinktų koordinatė ašiu kryptiu (izotropiškumo prielaida).

Tektoniniai įtempimai plokštumoje aprašomi simetriniu įtampų tenzoriumi [6–8, 10, 12, 13]:

$$\tilde{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

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

Svarbiausieji tektoniniai įtempimai apskaičiuojami iš kvadratinės lygties [7, 27]:

$$\sigma^2 - I_1 \cdot \sigma + I_2 = 0, \quad (16)$$

kuri gaunama išskleidus determinantą [6, 7]:

$$\det \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{bmatrix} = \quad (17)$$

$$= \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma \end{vmatrix} = 0,$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}, \quad (18)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{vmatrix}, \quad (19)$$

čia σ – svarbiausieji įtempiai, I_1 , I_2 – įtampų tenzorius invariantai.

Išsprendus kvadratinę lygtį (16) gaunamos dvi tikrosios šaknys – σ_1 , σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$), t. y. σ_1 – maksimalus svarbiausiasis įtempimas, σ_2 – minimalus svarbiausiasis įtempimas.

4. Plokštuminių poslinkių, horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtampų 2-D modeliavimas

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų ir tektoninių įtampų modeliavimo pavyzdys, taikant *Ansys* programą, atliktas pagal Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono geodezinių matavimų duomenis.

1998 m. įrengtas specialus GPS tinklas dabartiniams horizontaliesiems Žemės plutos judesiams matuoti [5, 28]. Tinkle yra 10 gruntinių punktų. Jie išdėstyti atsižvelgiant į svarbiausių tektoninių blokų dabartinį tektoninį aktyvumą. Keturi punktai nuo elektrinės nutolę iki 10 km spinduliu, kiti yra kelių dešimčių kilometrų atstumu. Punktų išdėstymo schema parodyta 1 pav.

Punktai išdėstyti taip, kad būtų galima kontroliuoti svarbiausių Žemės plutos lūžių ribojamų blokų judesius. Matavimai geodinaminiam poligone atlikti 1998 ir 1999 m. rugsėjį. Matuota *ASHTECH Z-Surveyor* ir *Z-12 GPS* prietaisais. Matavimus atliko VGTU ir Danijos firmos „Nellemann & Bjornkjar“ specialistai. Matavimų programą sudarė 4 sesijos. Vienos sesijos trukmė – 24 valandos. Visas 4 sesijas buvo matuojama 1, 2, 4, 6, 9, 10 gruntiniuose punktuose, o 2 sesijas – 3, 5, 7 ir 8 gruntiniuose punktuose. Matavimų programa pateikta [5, 28] darbuose.

Matavimų duomenys apdoroti VGTU Geodezijos institute ir Danijos firmoje „Nellemann & Bjornkjar“ naudojant programinius paketus GPPS ir FILLNET [29].

Apdorojus matavimų duomenis nustatyta, kad vidutinės kvadratinės poligono stygų matavimo paklaidos yra 0,3–2,4 mm. Punktų koordinatė vidutinės kvadratinės paklaidos – ne didesnės kaip 1,2 mm. Punktų koordinatė pokyčiai, gauti atlikus GPS matavimus 1998 m. rugsėjį ir 1999 m. rugsėjį, pateikti 1 lentelėje.

Tyrimams atlikti pasirinktas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas, nes elektrinė pastatyta stambių tektoninių struktūrų Mozūrijos–Baltarusijos antekklizės, Baltijos sineklizės ir Latvijos balno sandūroje.

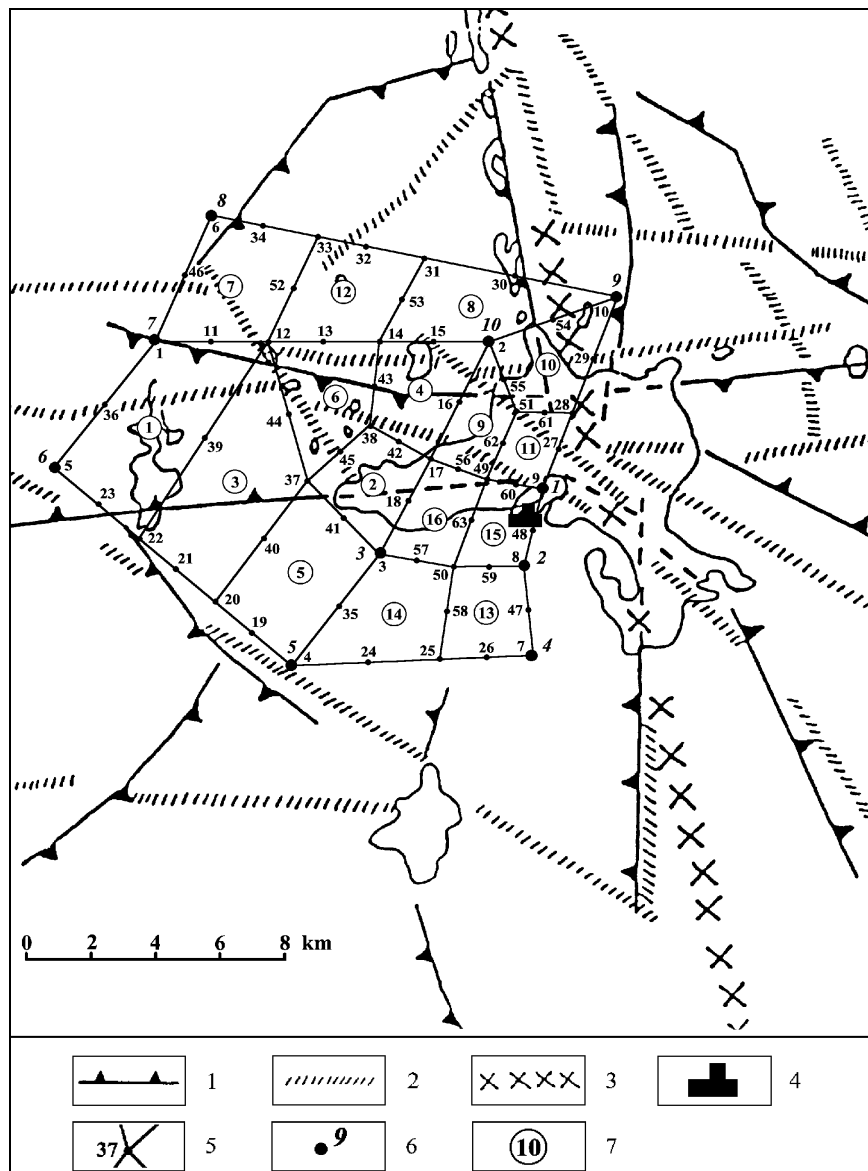
Kristaliniame paviršiuje išskiriamos žemesniosios eilės tektoninės struktūros: šiaurinė Zarasų pakopa, rytinis Drūkšių grabenas, Anisimovičių grabenas, Drūkšių įlinkis ir pietinis Drūkšių pakilimas [30, 31].

Pagal pateiktą skaičiavimo metodiką horizontaliesiems Žemės plutos poslinkiams, deformacijoms bei įtampoms modeliuoti sudarytas plokštuminio (2–D) geometrinio kūno modelis. Modelis sudarytas įtraukiant visus geodinaminio poligono gruntinius punktus. Taikytas baigtinių elementų metodas [14, 32, 33], darant prielaidą, kad pasirinktų riboto dydžio geometrinių elementų deformacijos yra izotropinio pobūdžio.

Dviejų dimensijų geometrinio kūno modelis sudarytas iš 16 baigtinių elementų, baigtiniais elementais laikomi keturkampiai (1 pav.). Nagrinėjamosios teritorijos skaidymas baigtiniais elementais (keturkampiais) atliktas naudojant *Ansys* programą [6].

Keturkampis aprašomas aštuoniais mazginiais taškais: I, J, K, L, M, N, O, P. Kiekvienas keturkampio mazginis taškas turi du laisvės laipsnius – poslinkius šiaurės ir rytų kryptimis.

Sąlyginės kiekvieno baigtinio elemento koordinatų sistemos pradžia sutampa su baigtinio elemento svorio centru, ašių kryptys – su pasirinktos bendrosios koordinatų sistemos ašių kryptimis, o reikšmės

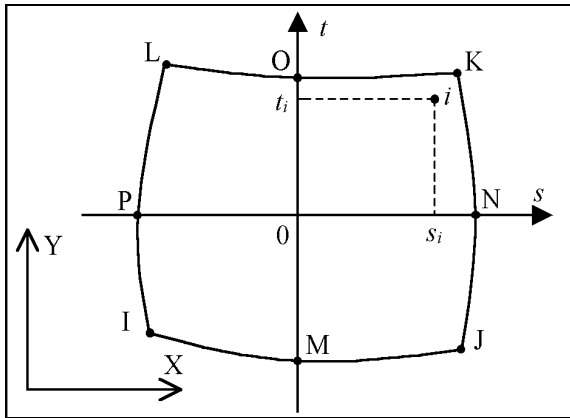


1 pav. Tektoninių lūžių padėčių ir baigtinių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje. Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę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

Fig 1. The location scheme of the tectonic breaks and network of the finite elements at the Ignalina nuclear power plant. Tectonic breaks (according to I. Juknelis, V. Marcinkevičius, I. Šeštokas and A. Šliaupa) discovered by: 1 – seismic survey, 2 – aeromagnetic survey, 3 – morphostructural analysis; 4 – Ignalina Nuclear Power Plant, 5 – finite element node, 6 – GPS point, 7 – finite element number

1 lentelė. Punktų koordinatinių pokyčiai
Table 1. Alterations of point coordinates

| Punkto numeris | Δx (m) | Δy (m) | Punkto numeris | Δx (m) | Δy (m) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,000 | 0,000 | 6 | -0,006 | 0,008 |
| 2 | 0,013 | 0,004 | 7 | 0,003 | 0,002 |
| 3 | 0,008 | 0,009 | 8 | -0,010 | -0,002 |
| 4 | 0,010 | 0,000 | 9 | 0,004 | 0,001 |
| 5 | 0,013 | 0,004 | 10 | 0,005 | 0,000 |



2 pav. Baigtinio elemento geometrinė schema
Fig 2. Geometrical scheme of the finite element

baigtiniame elemente kinta nuo -1 iki +1.

Baigtinio elemento (keturkampio) geometrija, mazginių taškų pasiskirstymas bei koordinatinių sistema pateikiama 2 paveiksle.

Poslinkiai geometriniam elemente aprašomi formulėmis [6, 13, 26]:

$$\begin{aligned}
 u_i = & \frac{1}{4} (u_I (1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1) + \\
 & + u_J (1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1) + \\
 & + u_K (1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1) + \\
 & + u_L (1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1)) + \\
 & + \frac{1}{2} (u_M (1-s_i^2)(1-t_i) + u_N (1+s_i)(1-t_i^2) + \\
 & + u_O (1-s_i^2)(1+t_i) + u_P (1-s_i)(1-t_i^2))
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 v_i = & \frac{1}{4} (v_I (1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1) + \\
 & + v_J (1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1) + \\
 & + v_K (1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1) + \\
 & + v_L (1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1)) + \\
 & + \frac{1}{2} (v_M (1-s_i^2)(1-t_i) + v_N (1+s_i)(1-t_i^2) + \\
 & + v_O (1-s_i^2)(1+t_i) + v_P (1-s_i)(1-t_i^2))
 \end{aligned} \quad (21)$$

čia $u_I, u_J, u_K, u_L, u_M, u_N, u_O, u_P, v_I, v_J, v_K, v_L, v_M, v_N, v_O, v_P$ – koordinatinių poslinkiai mazginiuose taškuose, s_i, t_i – skaičiuojamųjų taškų sąlyginių koordinatinių reikšmės.

Geometrinių elementų mazginių taškų koordinatinių poslinkiai nustatyti baigtinių elementų metodu pagal GPS tinklo koordinatinių poslinkius (2 lentelė), taikant Ansys programą [6].

Skaičiuojant mazginių taškų poslinkius, įvertinamas mechaninis izotropinio kūno plokštuminis deformacijų modelis.

2 lentelė. Mazginių taškų poslinkiai
Table 2. Movements of nodes

| Taško numeris | Δx (m) | Δy (m) |
|---------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,003 | 0,002 |
| 2 | 0,005 | 0,000 |
| 3 | 0,008 | 0,009 |
| 4 | 0,013 | 0,004 |
| 5 | -0,006 | 0,008 |
| 6 | -0,010 | -0,002 |
| 7 | 0,010 | 0,000 |
| 8 | 0,013 | 0,004 |
| 9 | 0,000 | 0,000 |
| 10 | 0,004 | 0,001 |
| 11 | 0,000 | 0,002 |
| 12 | 0,003 | 0,002 |
| 13 | 0,004 | 0,002 |
| 14 | 0,005 | 0,002 |
| 15 | 0,006 | 0,001 |
| 16 | 0,006 | 0,002 |
| 17 | 0,007 | 0,003 |
| 18 | 0,008 | 0,005 |
| 19 | 0,009 | 0,006 |
| 20 | 0,005 | 0,007 |
| 21 | 0,003 | 0,006 |
| 22 | 0,002 | 0,006 |
| 23 | 0,001 | 0,007 |
| 24 | 0,008 | 0,006 |
| 25 | 0,008 | 0,006 |
| 26 | 0,010 | 0,004 |
| 27 | 0,003 | 0,003 |
| 28 | 0,005 | 0,003 |
| 29 | 0,005 | 0,001 |
| 30 | 0,005 | 0,001 |
| 31 | 0,006 | 0,001 |
| 32 | 0,005 | 0,000 |
| 33 | 0,003 | -0,001 |
| 34 | -0,001 | -0,001 |
| 35 | 0,009 | 0,007 |
| 36 | 0,002 | 0,001 |

2 lentelės tęsinys

| Taško numeris | Δx (m) | Δy (m) |
|---------------|----------------|----------------|
| 37 | 0,005 | 0,005 |
| 38 | 0,006 | 0,003 |
| 39 | 0,003 | 0,004 |
| 40 | 0,006 | 0,006 |
| 41 | 0,007 | 0,006 |
| 42 | 0,006 | 0,003 |
| 43 | 0,005 | 0,002 |
| 44 | 0,004 | 0,003 |
| 45 | 0,006 | 0,004 |
| 46 | -0,003 | 0,001 |
| 47 | 0,011 | 0,005 |
| 48 | 0,007 | 0,002 |
| 49 | 0,007 | 0,003 |
| 50 | 0,008 | 0,005 |
| 51 | 0,005 | 0,003 |
| 52 | 0,002 | 0,002 |
| 53 | 0,006 | 0,001 |
| 54 | 0,005 | 0,001 |
| 55 | 0,005 | 0,002 |
| 56 | 0,007 | 0,003 |
| 57 | 0,008 | 0,007 |
| 58 | 0,008 | 0,005 |
| 59 | 0,009 | 0,004 |
| 60 | 0,006 | 0,002 |
| 61 | 0,004 | 0,003 |
| 62 | 0,006 | 0,003 |
| 63 | 0,008 | 0,003 |

Baigtinio elemento mazginiuose taškuose įvertintos: santykinės linijinės bei šlyties horizontaliosios Žemės plutos deformacijos, normalinių bei tangentiųjų tektoninių įtampų prieaugiai, svarbiausių tektoninių įtampų prieaugiai bei jų kryptys. Baigtinio elemento (keturkampio) svarbiausių tektoninių įtampų kryptys pavaizduotos 3 paveiksle. Horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtampų prieaugių reikšmės pateiktos 3 lentelėje. Svarbiausios įtampos yra tarpusavyje statmenos.

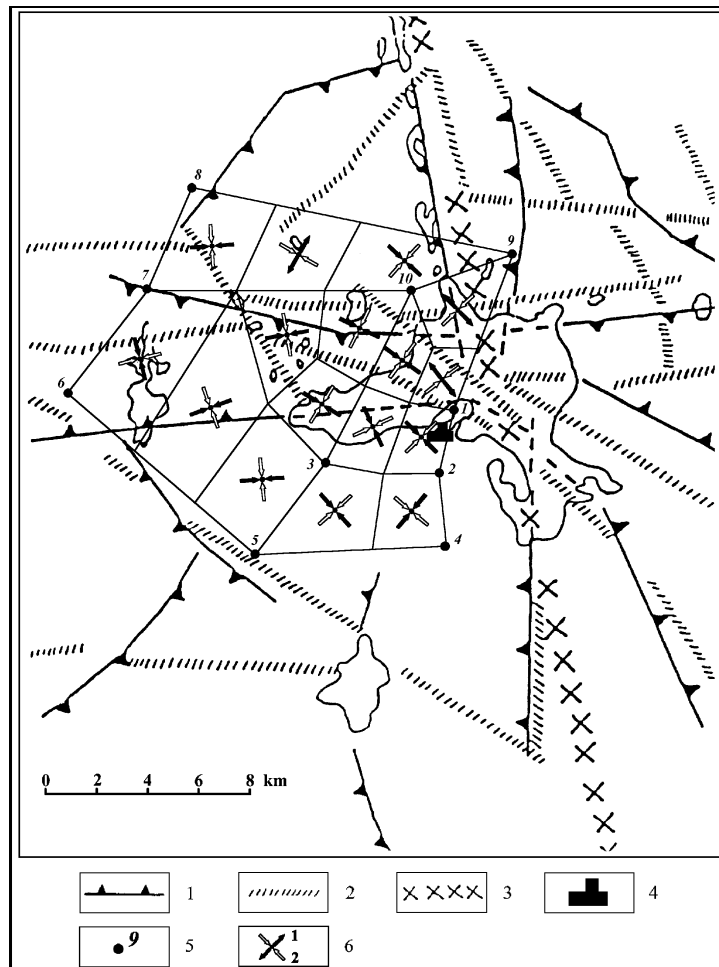
Remiantis modeliavimo analizės rezultatais (3 pav. ir 3 lentelė) Ignalinos atominės elektrinės rajone pastebimi tam tikri Žemės plutos svarbiausių įtampų prieaugių pasiskirstymo dėsningumai. Jie yra susiję su teritorijos tektonine sandara [30, 31]. Maksimalių įtampų prieaugiai beveik lygiagretūs su kristalinio pamato lūžiais, o minimalių įtampų prieaugiai jiems statmeni.

Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtampų Ignalinos atominės elektrinės rajone rezultatai, gauti modeliuojant baigtinių elementų metodu, neprieštarauja [5, 28, 34] darbuose pateiktiems tyrimų duomenims.

Plokštuminių poslinkių, horizontaliųjų deformacijų bei tektoninių įtampų modeliavimas baigtinių elementų metodu leidžia tiksliau bei detaliau nustatyti Žemės plutos judesių dėsningumus, atsižvelgiant į mechanines bei struktūrines tiriamojo regiono savybes.

3 lentelė. Horizontaliosios deformacijos bei tektoninių įtampų prieaugiai
Table 3. Horizontal deformations and growths of tectonic stresses

| Mazginio taško nr. | $\varepsilon_{xx} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{yy} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{zz} \cdot 10^{-6}$ | $\varepsilon_{xy} \cdot 10^{-6}$ | σ_{xx} , MPa | σ_{yy} , MPa | σ_{xy} , MPa | σ_1 , MPa | σ_2 , MPa |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1 | 0,563 | 0,006 | -0,190 | -2,520 | 0,042 | 0,011 | -0,071 | 0,099 | -0,046 |
| 2 | -0,096 | 0,006 | 0,030 | -0,866 | -0,007 | -0,001 | -0,024 | 0,020 | -0,029 |
| 3 | -0,753 | 0,199 | 0,185 | -1,105 | -0,053 | 0,001 | -0,031 | 0,015 | -0,067 |
| 4 | 0,089 | -1,940 | 0,617 | 0,306 | -0,030 | -0,143 | 0,009 | -0,029 | -0,144 |
| 5 | -1,647 | 0,322 | 0,442 | 1,755 | -0,117 | -0,007 | 0,049 | 0,012 | -0,136 |
| 6 | 0,869 | -5,416 | 1,516 | 3,464 | -0,036 | -0,388 | 0,097 | -0,011 | -0,413 |
| 7 | -3,143 | -0,302 | 1,148 | 3,537 | -0,240 | -0,081 | 0,099 | -0,034 | -0,288 |
| 8 | 1,621 | -1,686 | 0,022 | 2,812 | 0,090 | -0,096 | 0,079 | 0,119 | -0,125 |
| 9 | -1,947 | 0,860 | 0,362 | -6,257 | -0,129 | 0,028 | -0,175 | 0,141 | -0,243 |
| 10 | 0,004 | -0,453 | 0,150 | -0,290 | -0,008 | -0,034 | -0,008 | -0,006 | -0,036 |
| 12 | 0,284 | -1,081 | 0,266 | 1,046 | 0,001 | -0,075 | 0,029 | 0,011 | -0,085 |
| 14 | -0,350 | -0,071 | 0,140 | 0,151 | -0,027 | -0,012 | 0,004 | -0,011 | -0,029 |
| 17 | 0,029 | -0,648 | 0,206 | 0,068 | -0,010 | -0,048 | 0,002 | -0,010 | -0,048 |
| 20 | 0,091 | -0,414 | 0,108 | 1,586 | -0,001 | -0,029 | 0,044 | 0,031 | -0,062 |
| 22 | -0,444 | 0,108 | 0,112 | -0,620 | -0,031 | 0,000 | -0,017 | 0,008 | -0,039 |
| 25 | 0,198 | 0,237 | -0,145 | 0,878 | 0,019 | 0,021 | 0,025 | 0,045 | -0,004 |
| 28 | 0,255 | -0,047 | -0,069 | 0,765 | 0,018 | 0,001 | 0,021 | 0,033 | -0,013 |
| 31 | 0,175 | 0,108 | -0,094 | 0,132 | 0,015 | 0,011 | 0,004 | 0,017 | 0,009 |
| 33 | -0,496 | 1,101 | -0,202 | -0,437 | -0,016 | 0,073 | -0,012 | 0,075 | -0,018 |
| 37 | -0,027 | -0,586 | 0,204 | -0,581 | -0,013 | -0,044 | -0,016 | -0,006 | -0,051 |
| 38 | -0,095 | -0,511 | 0,202 | -0,186 | -0,017 | -0,040 | -0,005 | -0,016 | -0,041 |
| 49 | -0,301 | -1,143 | 0,481 | 0,812 | -0,044 | -0,091 | 0,023 | -0,035 | -0,100 |
| 50 | -1,354 | -0,196 | 0,517 | -0,610 | -0,105 | -0,040 | -0,017 | -0,036 | -0,109 |
| 51 | -0,054 | 0,424 | -0,123 | -2,580 | 0,004 | 0,031 | -0,072 | 0,091 | -0,056 |



3 pav. Svarbiausių tektoninių Žemės plutos įtampų prieaigų kryptys. Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę analizę; 4 – Ignalinos atominė elektrinė, 5 – GPS punktas, 6 – svarbiausieji įtempiai (1 – maksimalaus svarbiausiojo įtempio prieaugis, 2 – minimalaus svarbiausiojo įtempio prieaugis)

Fig 3. Directions of growths of the principal tectonic Earth crust stresses. Tectonic breaks (according to I. Juknelis, V. Marcinkevičius, I. Šeštokas and A. Šliaupa) discovered by: 1 – seismic survey, 2 – aeromagnetic survey, 3 – morphostructural analysis; 4 – Ignalina nuclear power plant, 5 – GPS point, 6 – the principal stresses (1 – maximum growth of the principal stress, 2 – minimum growth of the principal stress)

5. Išvados

1. Taikant *Ansys* programą poslinkiams, Žemės plutos deformacijoms bei įtampoms modeliuoti baigtinių elementų metodu įvertinamos mechaninės ir struktūrinės Žemės plutos judesių deformacijų bei įtampų savybės.

2. Pagal atvirkštinį Huko dėsnį nustatyta tektoninių įtampų kaita, įtampų kitimo prieaugiai tarp kartotinių matavimų bei įtampų kryptys. Įvertinami horizontaliųjų deformacijų parametrai: santykinės linijinės bei šlyties horizontaliosios deformacijos.

3. Baigtinių elementų metodu, taikant *Ansys* programą, sudarytas horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje modelis rodo, kad analizuojamoje teritorijoje yra akivaizdi įtampų kaita ir ji susijusi su Žemės plutos sandara. Svarbiausiųjų maksimalių įtampų prieaigų kryptingumas yra artimas pagrindinių Žemės plutos lūžių šioje teritorijoje kryptims ir kinta nuo $-0,036$ MPa iki $0,141$ MPa, o minimalių įtampų

prieaigų kryptingumas – statmenas tektoniniams lūžiams, kinta nuo $-0,413$ MPa iki $0,009$ MPa.

4. Atlikus teorinius ir eksperimentinius tyrimus galima teigti, kad *Ansys* programos taikymas Žemės plutos deformacijų ir tektoninių įtampų pokyčiams analizuoti – gera galimybė tyrinėtojiui gauti naujų duomenų apie geodinaminių procesų raidą.

Literatūra

1. Zakarevičius, A. Investigation of the recent geodynamic processes in the territory of Lithuania (Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas). Vilnius: Technika, 2003. 195 p. (in Lithuanian).
2. Zakarevičius, A. Analysis of deformations of zero order GPS network. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, No 1(23). Vilnius: Technika, 1996, p. 53–61 (in Lithuanian).
3. Calais, E.; Galisson, L.; Stéphan, J.-F.; Delteil, J.; Deverchère, J.; Larroque, C.; Mercier de Lépinay, B.; Popoff, M.; Sossou, M. Crustal strain in the Southern

- Alps, France, 1948–1998. *Tectonophysics*, Vol 319, Issue 1. Elsevier Science B. V., 2000, p. 1–17.
4. Ferhat, G.; Feigl, K. L.; Ritz, J.-F.; Souriau, A. Geodetic measurement of tectonic deformation in the southern Alps and Provence, France, 1947–1994. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 159, Issues 1–2. Elsevier Science B. V., 1998, p. 35–46.
 5. Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A. Horizontal deformations of the Earth's crust in Ignalina nuclear power plant region (Горизонтальные деформации земной коры в районе Игналинской атомной электростанции). *Engineering geodesy (Инженерна геодезія)*, 49, КИЇВ, 2003, p. 102–110 (in Russian).
 6. *Ansys Theory Reference*. Tenth Edition. SAS IP, Inc., 1998.
 7. Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. Foundations of the theory of elasticity (Tampromo teorijos pagrindai). Vilnius: Technika, 2000. 264 p. (in Lithuanian).
 8. Čyras, A.; Borkowski, A.; Karkauskas, R. Theory and methods of optimization of rigid-plastic systems. Vilnius: Technika, 2004. 354 p.
 9. Jaeger, J. C. Elasticity, fracture and flow: with engineering and geological applications. 3rd ed. London: Methuen, 1969. 268 p.
 10. Singiresu S. Rao. The finite element method in engineering. Third edition. Butterworth–Heinemann, 1999. 556 p.
 11. Varadan, T. K.; Bhaskar, K. Analysis of plates: theory and problems. Narosa Publishing House, 1999. 190 p.
 12. Zadro, M.; Braitenberg, C. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth-Science Reviews*, Vol 47, Issues 3–4. Elsevier Science B. V., 1999, p. 151–187.
 13. Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. The finite element method. Vol 1, Fifth edition. Butterworth-Heinemann, 2000. 689 p.
 14. Čyras, A. Structural mechanics (Statybinė mechanika). Vilnius: Mokslas, 1989. 446 p. (in Lithuanian).
 15. Petroškevičius, P. Gravitation field effect on geodetic observations (Gravitacijos lauko poveikis geodeziniamis matavimams). Vilnius: Technika, 2004. 292 p. (in Lithuanian).
 16. Serpelloni, E.; Anzidei, M.; Baldi, P.; Casula, G.; Galvani, A.; Pesci, A.; Riguzzi, F. Geodetic deformations in the central-southern Apennines (Italy) from repeated GPS surveys. *Annali di Geofisica*, Vol 44, No 3. Editrice Compositori, 2001, p. 627–647.
 17. Puglisi, G.; Bonforte, A.; Maugeri, S. R. Ground deformation patterns on Mount Etna, 1992 to 1994, inferred from GPS data. *Bulletin of Volcanology*, Vol 62, Nos 6–7. Springer–Verlag Heidelberg, 2001, p. 371–384.
 18. Shanlong Kuang. Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications. Ann Arbor Press, Inc. Chelsea, Michigan, 1996. 368 p.
 19. Ruiz, A. M.; Ferhat, G.; Alfaro, P.; Sanz de Galdeano, C.; de Lacy, M. C.; Rodríguez-Caderot, G.; Gil, A. J. Geodetic measurements of crustal deformation on NW–SE faults of the Betic Cordillera, southern Spain, 1999–2001. *Journal of Geodynamics*, Vol 35, Issue 3. Pergamon-Elsevier science Ltd, 2003, p. 259–272.
 20. Sagiya, T.; Miyazaky, S.; Tada, T. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol 157, Nos 11–12. Birkhäuser Verlag AG, 2000, p. 2303–2322.
 21. Sue, C.; Martinod, J.; Tricart, P.; Thouvenot, F.; Gamond, J.-F.; Fréchet, J.; Marinier, D.; Glot, J.-P.; Grasso, J.-R. Active deformation in the inner Western Alps inferred from comparison between 1972-classical and 1996-GPS geodetic surveys. *Tectonophysics*, Vol 320, Issue 1. Elsevier Science B. V., 2000, p. 17–29.
 22. Vigny, C.; Chéry, J. et al. GPS network monitors the Western Alps' deformation over a five-year period: 1993–1998. *Journal of Geodesy*, Vol 76, Issue 2. Springer–Verlag Heidelberg, 2002, p. 63–76.
 23. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. The dispersion structure of horizontal deformations of Lithuanian geodetic networks. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVIII, No 4, Vilnius: Technika, 2002, p. 117–124 (in Lithuanian).
 24. Vaníček, P.; Craymer, M. R.; Krakiwsky, E. J. Robustness analysis of geodetic horizontal networks. *Journal of Geodesy*, Vol 75, No 4. Springer–Verlag, 2001, p. 199–209.
 25. Vaníček, P.; Krakiwsky, E. J. Geodesy: The concepts. 2nd rev. ed. North Holland, Amsterdam, 1986. 697 p.
 26. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Modelling the horizontal movements and deformations of the earth crust by the finite element method. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXX, No 2, Vilnius: Technika, 2004, p. 35–40 (in Lithuanian).
 27. Esikov, N. Tectonophysical aspects of the analysis of modern movements of a terrestrial surface (Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности). Новосибирск: Наука, 1979. 182 p. (in Russian).
 28. Zakarevičius, A.; Stanionis, A. The features of dispersion of horizontal deformations of the Earth's crust in the region of Ignalina nuclear power plant. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXIX, No 4, Vilnius: Technika, 2003, p. 119–123 (in Lithuanian).
 29. Skeivalas, J.; Paršeliūnas, E.; Ramanauskas, R. The treatment of the results of the measurements of the Lithuanian first order GPS network. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, No 1(21), Vilnius: Technika, 1995, p. 21–30 (in Lithuanian).
 30. Marcinkevičius, V.; Laškovas, J. Tectonic conditions of Ignalina Nuclear Power Plant region. *Geological horizons (Geologijos akiračiai)*, No 1–2. Vilnius, 1996, p. 8–23 (in Lithuanian).
 31. Tectonic structure of Lithuania (Lietuvos tektoninė sandara). Compiled and edited by P. Suveizdis, Institute of Geology and Geography, Vilnius, 2003. 160 p. (in Lithuanian).
 32. Muñoz-Martín, A.; Cloetingh, S.; De Vicente, G.; Andeweg, B. Finite-element modelling of Tertiary paleostress fields in the eastern part of the Tajo Basin (central Spain). *Tectonophysics*, Vol 300, Issues 1–4. Elsevier Science B. V., 1998, p. 47–62.
 33. Bada, G.; Cloetingh, S.; Gerner, P.; Horváth, F. Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. *Geophysical Journal International*, Vol 134, Issue 1. Blackwell Publishing Ltd., 1998, p. 87–101.
 34. Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A. Modelling the horizontal deformations of the Earth crust by the finite element method (Моделирование горизонтальных деформаций земной коры методом конечных элементов). *Engineering geodesy (Инженерна геодезія)*, 50, КИЇВ, 2004, p. 61–71 (in Russian).

Algimantas ZAKAREVIČIUS. Doctor Habil, Professor, Head of Dept of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania (tel. +37052744701), e-mail:

Algimantas.Zakarevicius@ap.vtult.

A graduate of Kaunas Polytechnic Institute (now Kaunas University of Technology), geodetic engineer, 1965. Doctor's degree at Vilnius University, 1973. Dr Habil degree at VGTU, 2000. Member of the Geodetic Commission of Estonia, Latvia and Lithuania. Research training at Geodetic Institute of Norwegian Mapping Authority, 1994. Author of over 130 publications and 3 monographs.

Research interests: investigations of the recent geodynamic processes, formation of geodetic networks.

Arminas STANIONIS. Doctoral student.

Vilnius Gediminas Technical University, Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania (tel. +37052744703), e-mail: ArminasStanionis@one.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) (Master of science, 2002). Author and co-author of 10 publications.

Research interests: investigation of geodynamic processes, GIS, investigations of deformations.