

UDK 528.481:551.24

ERDVINIŲ GEODINAMINIŲ ĮTEMPIŲ TYRIMAS PAGAL GEODEZINIŲ MATAVIMŲ REZULTATUS

Algimantas Zakarevičius, Arminas Stanionis

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

[Iteikta 2006 11 21, priimta 2006 12 21]

Santrauka. Žemės plutos erdvinį geodinaminių įtempimų pokyčiai nustatyti tenzorinės analizės būdu, tenzorinės komponentės pagal geodezinių matavimų rezultatus įvertinant baigtinių elementų metodu. Įtempimus išreiškus deformacijomis, pagal atvirkštinį Huko dėsnį gauti nauji Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone charakteristikų duomenys – erdvinį geodinaminių normalinių bei tangentiųjų įtempimų pokyčiai. Erdvinių geodinaminių įtempimų pokyčiai kinta nuo $-0,082$ MPa iki $0,097$ MPa. Remiantis tyrimo rezultatais, daroma išvada, kad Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorija geodinaminiu atžvilgiu yra aktyvi.

Reikšminiai žodžiai: atvirkštinis Huko dėsnis, deformacijų ir įtempimų tenzoriai, erdvinį geodinaminių įtempimų pokyčiai, erdvinės Žemės plutos deformacijos, GPS.

1. Įvadas

Taikant naujas geodezinių tinklų matavimų technologijas, globalinės padėties nustatymo sistemas (GPS), galima sudaryti precizinio tikslumo erdvinis geodezinius tinklus. Turint tokių tinklų kartotinių matavimų duomenis galima įvertinti erdvinės deformacijas bei geodinaminių įtempimų pokyčius [1–4]. Pagal juos galima apibūdinti erdvinį Žemės plutos judesių, vykusių per laiko intervalą tarp kartotinių matavimų, savybes.

Teoriškai pagrįsta erdvinį geodinaminių Žemės plutos įtempimų pokyčių tenzorinę skaičiavimo metodiką, darant prielaidą, kad erdvinės deformacijos pagal pobūdį yra vienalytės bei izotropinės. Taikant fizinę sąsają tarp erdvinio deformacijų bei įtempimų gauti nauji eksperimentinio tyrimo rezultatai – erdvinio geodinaminių įtempimų pokyčiai.

Pagal apibrėžtas Žemės plutos erdvinio geodinaminių įtempimų pokyčių kitimo tendencijas galima tiksliau nustatyti dabartinį tektoninių struktūrų aktyvumą. Platesnės gautųjų charakteristikų rezultatų interpretavimo galimybės geotektoniniu atžvilgiu, nes gautieji skaičiavimo duomenys išreiškiami ne santykiniu dydžiu – kaip erdvinio deformacijų parametrai bei jų įverčiai, o jėgos vienetais, tenkančiais ploto vienetui.

2. Žemės plutos erdvinio geodinaminių įtempimų skaičiavimo metodika

Bendruoju atveju ties deformuojamo kūno tašku deformacijas ε_{XX} , ε_{YY} , ε_{ZZ} , ε_{XY} , ε_{XZ} , ε_{YZ} su poslinkiais u , v , w sieja šešios Koši lygtys [5–7]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{XX} = \varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial X}, & \varepsilon_{XY} = \varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X}, \\ \varepsilon_{YY} = \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial Y}, & \varepsilon_{XZ} = \varepsilon_{13} = \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial X}, \\ \varepsilon_{ZZ} = \varepsilon_{33} = \frac{\partial w}{\partial Z}, & \varepsilon_{YZ} = \varepsilon_{23} = \frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial Y}, \end{cases} \quad (1)$$

čia

$$\begin{aligned} u &= u_1 = \Delta X = u(X, Y, Z), \\ v &= u_2 = \Delta Y = v(X, Y, Z), \\ w &= u_3 = \Delta Z = w(X, Y, Z), \end{aligned} \quad (2)$$

u , v , w – erdvinio koordinatinių pokyčiai (geodezinių punktų erdviniai poslinkiai), išreikšti tiesinėmis koordinatinių funkcijomis Dekarto koordinatinių sistemoje, ε_{XX} , ε_{YY} , ε_{ZZ} – santykinės linijinės deformacijos, ε_{XY} , ε_{XZ} , ε_{YZ} – santykinės šlyties deformacijos.

Kaip matyti iš (1) formulės tarp Žemės plutos erdvinio deformacijų

$$\varepsilon = [\varepsilon_{XX} \quad \varepsilon_{YY} \quad \varepsilon_{ZZ} \quad \varepsilon_{XY} \quad \varepsilon_{XZ} \quad \varepsilon_{YZ}]^T \quad (3)$$

ir poslinkių

$$\mathbf{u} = [u \quad v \quad w]^T \quad (4)$$

vektorių komponentų egzistuoja ryšys.

Operatorine-matricine forma Koši geometrinės lygtys užrašomos [5, 6]:

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

čia ∇ – Hamiltono operatorius.

Transponuotasis Hamiltono operatorius [5]:

$$\nabla^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} \\ \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial Z} & 0 & \frac{\partial}{\partial X} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Z} & \frac{\partial}{\partial Y} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Įvertinant Žemės plutos erdvinės deformacijas taikoma mažųjų deformacijų prielaida (kūno taškų linijiniai poslinkiai maži, palyginti su jo matmenimis, o kūno elementų deformacijos ir kampiniai poslinkiai maži, palyginti su vienetu), t. y. išnyksta skirtumas tarp Lagranžo ir Oilerio koordinatijų bei – tarp Gryno ir Almanzi tenzorių [8].

Tuomet Žemės plutos erdvinės deformacijas pagal (1) formulę galima aprašyti simetriiniu mažųjų deformacijų tenzoriumi [5, 8]:

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{XX} & \frac{1}{2}\varepsilon_{XY} & \frac{1}{2}\varepsilon_{XZ} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{XY} & \varepsilon_{YY} & \frac{1}{2}\varepsilon_{YZ} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{XZ} & \frac{1}{2}\varepsilon_{YZ} & \varepsilon_{ZZ} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Koeficientai $\frac{1}{2}$ prie šlyties deformacijų formaliai

reikalingi tam, kad pereinant nuo vienos koordinatijų sistemos prie kitos Žemės plutos erdvių deformacijų tenzorius $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ elementai būtų perskaičiuojami pagal tas pačias, kaip ir geodinaminių įtempimų tenzorius komponentai, formules [5].

Svarbiausios erdvinės deformacijos apskaičiuojamos iš kubinės lygties [8, 9]:

$$\lambda^3 - I_1 \cdot \lambda^2 + I_2 \cdot \lambda - I_3 = 0, \quad (8)$$

$$I_1 = \varepsilon_{XX} + \varepsilon_{YY} + \varepsilon_{ZZ}, \quad (9)$$

$$I_2 = \varepsilon_{XX} \cdot \varepsilon_{YY} + \varepsilon_{YY} \cdot \varepsilon_{ZZ} + \varepsilon_{ZZ} \cdot \varepsilon_{XX} - \frac{1}{4}(\varepsilon_{XY}^2 + \varepsilon_{YZ}^2 + \varepsilon_{XZ}^2), \quad (10)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \varepsilon_{XX} & \frac{1}{2}\varepsilon_{XY} & \frac{1}{2}\varepsilon_{XZ} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{XY} & \varepsilon_{YY} & \frac{1}{2}\varepsilon_{YZ} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{XZ} & \frac{1}{2}\varepsilon_{YZ} & \varepsilon_{ZZ} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

čia λ – svarbiausios Žemės plutos erdvinės deformacijos, I_1 , I_2 , I_3 – deformacijų tenzorius invariantai.

Išsprendus kubinę lygtį (8) gaunamos trys tikrosios šaknys – λ_1 , λ_2 , λ_3 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$).

Turint apskaičiuotas erdvinės santykinės linijines bei šlyties deformacijas, gali būti įvertinti geodinaminių įtempimų pokyčiai, t. y. nustatyti įtempimų prieaugiai per tam tikrą laiko tarpą [10].

Erdviniams geodinaminiais įtempimais modeliuoti gali būti pritaikytas atvirkštinis Huko dėsnis, įtempimus išreiškus deformacijomis [5]:

$$\begin{cases} \sigma_{XX} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{XX} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), & \sigma_{XY} = G \cdot \varepsilon_{XY}, \\ \sigma_{YY} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{YY} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), & \sigma_{XZ} = G \cdot \varepsilon_{XZ}, \\ \sigma_{ZZ} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{ZZ} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), & \sigma_{YZ} = G \cdot \varepsilon_{YZ}, \end{cases} \quad (12)$$

čia

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (13)$$

G – šlyties modulis, E – tamprumo modulis $\left(7 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$ [11–13], $\vartheta = \varepsilon_{XX} + \varepsilon_{YY} + \varepsilon_{ZZ}$ – pirmasis deformacijų tenzorius $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ invariantas I_1 , ν – Puasono koeficientas (0,25) [14–16], σ_{XX} , σ_{YY} , σ_{ZZ} – normaliniai geodinaminiai įtempimai, σ_{XY} , σ_{XZ} , σ_{YZ} – tangentiniai geodinaminiai įtempimai.

Fizines priklausomybes (12) galima užrašyti matricine forma [5]:

$$\boldsymbol{\sigma} = K \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (14)$$

čia

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{YY} & \sigma_{ZZ} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} \end{bmatrix}^T, \quad (15)$$

$$K = \begin{bmatrix} (2G+\mu) & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & (2G+\mu) & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & (2G+\mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mu = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = \frac{2\nu \cdot G}{1 - 2\nu}, \quad (17)$$

σ – erdviųjų geodinaminių įtempių vektorius, ε – erdviųjų Žemės plutos deformacijų vektorius ((3) formulė), μ – Lamé koeficientas, K – standumo matrica.

Pagal tangentinių įtempių dualumo dėsnį [6] $\sigma_{XY} = \sigma_{YX}$, $\sigma_{XZ} = \sigma_{ZX}$, $\sigma_{YZ} = \sigma_{ZY}$. Tada geodinaminių įtempių būvis nusakomas simetriniu antrojo rango įtempių tenzoriumi [5, 17]:

$$\tilde{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_{ZZ} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

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

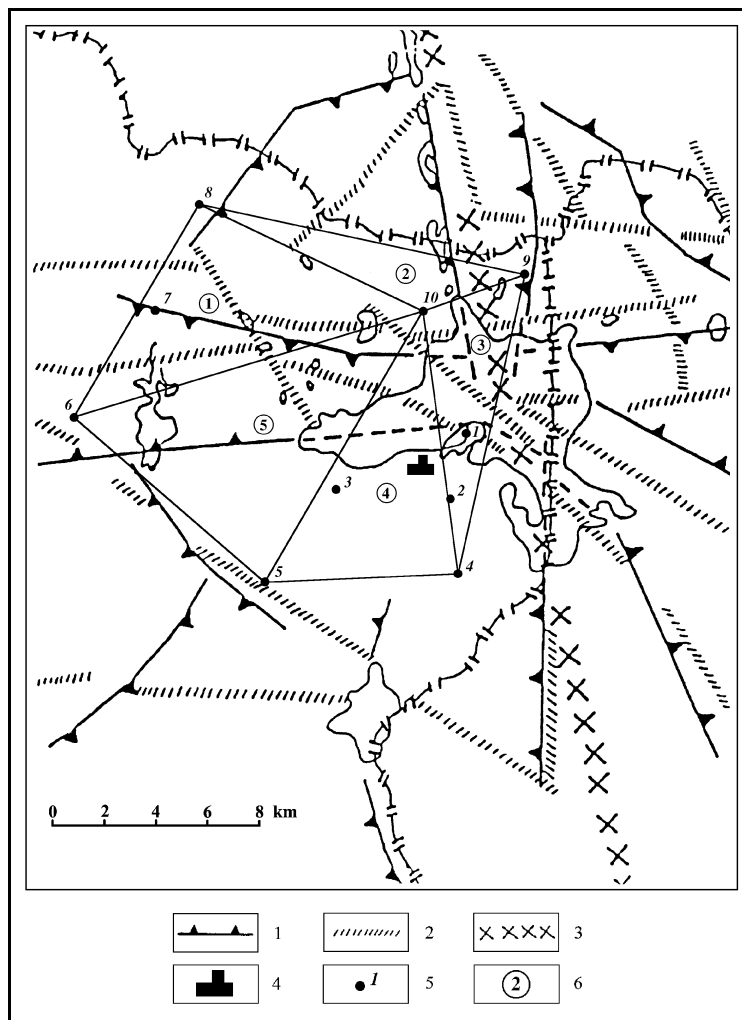
3. Erdviųjų geodinaminių įtempių pokyčių skaičiavimo rezultatai

Erdvinėms Žemės plutos deformacijoms bei geodinaminių įtempių pokyčiams tirti Ignalinos atominės elektrinės rajone 1998 m. įrengtas specialus GPS tinklas, kurį sudaro 10 gruntinių punktų. Punktų išdėstymo schema parodyta paveiksle.

Matavimai geodinamiame poligone atlikti 1998 ir 1999 m. rugsėjį. Geodinaminio poligono gruntinių punktų koordinatės, nustatytos GPS matavimais, pateiktos 1 lentelėje. Erdvinio geodezinio tinklo sudarymo ypatumai, matavimų programa bei naudoti prietaisai aprašyti [13, 16, 18, 19] darbuose.

Gruntinių punktų koordinatinių pokyčiai, gauti atlikus kartotinius GPS matavimus 1998 m. rugsėjį ir 1999 m. rugsėjį [19], pateikti 2 lentelėje.

Žemės plutos erdviųjų deformacijų parametrai bei jų kaitos dėsningumai tenzorinės analizės būdu įvertinti [20] darbe.



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

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 – GPS point, 6 – finite element number

1 lentelė. Erdvinės stačiakampės geocentrinės punktų koordinatės (ETRS 89)**Table 1.** Spatial rectangular geocentric coordinates of points (ETRS 89)

Punkto numeris	X_{98} (m)	Y_{98} (m)	Z_{98} (m)	X_{99} (m)	Y_{99} (m)	Z_{99} (m)
1	3229536,293	1616083,703	5239860,990	3229536,301	1616083,704	5239860,991
2	3231653,983	1616362,707	5238494,353	3231653,983	1616362,708	5238494,355
3	3233229,705	1612243,447	5238795,304	3233229,706	1612243,447	5238795,304
4	3233668,997	1617586,620	5236886,803	3233668,998	1617586,622	5236886,801
5	3237037,663	1610936,316	5236851,127	3237037,666	1610936,316	5236851,127
6	3235378,844	1602237,114	5240510,347	3235378,852	1602237,116	5240510,344
7	3230978,897	1603710,523	5242759,150	3230978,908	1603710,521	5242759,151
8	3227268,888	1603850,887	5244984,338	3227268,902	1603850,884	5244984,335
9	3223979,805	1616098,743	5243255,786	3223979,812	1616098,742	5243255,787
10	3226708,810	1613020,117	5242528,383	3226708,818	1613020,117	5242528,383

2 lentelė. Punktų koordinatinių pokyčiai**Table 2.** Changes of point coordinates

Punkto numeris	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Punkto numeris	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
1	0,008	0,001	0,001	6	0,008	0,002	-0,003
2	0,000	0,001	0,002	7	0,011	-0,002	0,001
3	0,001	0,000	0,000	8	0,014	-0,003	-0,003
4	0,001	0,002	-0,002	9	0,007	-0,001	0,001
5	0,003	0,000	0,000	10	0,008	0,000	0,000

3 lentelė. Geodinaminių įtempių pokyčiai**Table 3.** Changes of geodynamic stresses

Trikampio Nr.	σ_{XX} , MPa	σ_{YY} , MPa	σ_{ZZ} , MPa	σ_{XY} , MPa	σ_{XZ} , MPa	σ_{YZ} , MPa
1	-0,0817	-0,0030	-0,0518	0,0005	-0,0048	0,0060
2	0,0196	0,0715	0,0973	0,0145	0,0182	0,0181
3	-0,0049	0,0225	0,0583	-0,0041	0,0014	0,0083
4	-0,0646	-0,0103	-0,0253	-0,0135	-0,0037	-0,0133
5	-0,0602	-0,0303	-0,0260	-0,0048	-0,0015	0,0088

Pagal (14) formulę, taikant [20] darbe apskaičiuotus erdvinį deformacijų parametrus, įvertinta penkių baigtinių elementų (trikampių) geodinaminių įtempių pokyčių kaita (žr. pav.): apskaičiuoti normaliniai bei tangentiniai geodinaminių įtempių pokyčiai. Erdvinių geodinaminių įtempių pokyčiai priskiriami trikampio svorio centrui.

Apskaičiuoti erdvinio GPS tinklo geodinaminių įtempių pokyčių vektoriaus rezultatai pateikti 3 lentelėje.

Erdvinių normalinių įtempių pokyčių σ_{XX} kitimo ribos – nuo -0,082 MPa iki 0,020 MPa, σ_{YY} kinta nuo -0,030 MPa iki 0,072 MPa, o σ_{ZZ} – nuo -0,052 MPa iki 0,097 MPa (3 lentelė). Erdviniai geodinaminiai tangentių įtempių pokyčiai: σ_{XY} – nuo -0,014 MPa iki 0,014 MPa, σ_{XZ} – nuo -0,005 MPa iki 0,018 MPa, σ_{YZ} – nuo -0,013 MPa iki 0,018 MPa (3 lentelė).

Erdvinių geodinaminių įtempių pokyčiai σ_{XX} yra neigiamą ženklo (išskyrus 2 trikampį), σ_{YZ} – teigiami (išskyrus 4 trikampį), σ_{YY} , σ_{ZZ} , σ_{XZ} – 2 ir 3 trikampio teigiami (1, 4 ir 5 neigiami). Erdvinių geodinaminių įtempių pokyčiai σ_{XY} pasiskirsto pagal blokus, t. y. šiauriniame bloke įtempių pokyčiai yra teigiamieji, pietiniame – neigiamieji.

Bendrosios Žemės plutos erdvinį geodinaminių įtempių pokyčių Ignalinos atominės elektrinės rajone savybės siejasi su atliktais vertikaliųjų, horizontaliųjų ir erdvinį deformacijų bei plokštuminių geodinaminių įtempių pokyčių tyrimų rezultatais [10, 13, 18, 20, 21].

Turint Žemės plutos judesių erdvinį geodinaminių normalinių bei tangentių įtempių pokyčius galima apskaičiuoti ir įvertinti svarbiausių įtempių pokyčių kaitą. Taip pat tikslingai atlikti Žemės plutos judesių, atsižvelgiant į kristalinio pamato lūžių išsidėstymo ypatumus, potencinės energijos tyrimus, nustatyti bei įvertinti kaitos dėsniumus.

4. Išvados

1. Sudarytas erdvinį geodinaminių įtempių pokyčių skaičiavimo algoritmas bei pagal geodezinių matavimų duomenis atlikti eksperimentiniai tyrimai Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje. Sąsajoms tarp erdvinį Žemės plutos deformacijų ir geodinaminių įtempių pokyčių aprašyti taikytas atvirkštinis Huko dėsnis.

2. Taikant siūlomą geodinaminių įtempių įvertinimo metodiką gauti nauji erdvinį Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone duomenys – erdvinį geodinaminių įtempių pokyčiai. Metiniai erdvinį geodinaminių įtempių pokyčiai kinta nuo -0,082 MPa iki 0,097 MPa.

3. Normaliniai geodinaminių įtempių pokyčiai pasiskirsto pagal tektoninių lūžių lanko juostą, einančią iš pietryčių į šiaurės vakarus. Pietvakarinėje dalyje erdvinių normalinių įtempių pokyčiai yra neigiamieji (1, 4, 5 trikampis), o šiaurės rytinėje dalyje (2 ir 3 trikampis) – vyrauja teigiamosios ženklų reikšmės.

4. Erdvinių geodinaminių įtempių pokyčių tyrimo rezultatai patvirtina anksčiau atliktų vertikalųjų bei horizontaliųjų judesių tyrimų šioje teritorijoje išvadas apie dabartinį tektoninių lūžių aktyvumą, t. y. atitinka blokinę deformacijų modelio struktūrą ir teikia papildomos informacijos, reikalingos vertinant atominės elektrinės aplinkos ekogeodinaminę riziką.

Literatūra

- BAYER, R.; CHERY, J.; TATAR, M.; MASSON, F.; NILFOROUSHAN, F.; DOERFLINGER, E.; REGARD, V.; BELLIER, O. Active deformation in Zagros–Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, Vol 165, No 1. Blackwell Publishing limited, 2006, p. 373–381.
- CHANG, C.-P.; CHANG, T.-Y.; ANGELIER, J. et al. Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol 214, Numbers 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2003, p. 115–127.
- KOTZEV, V.; NAKOV, R.; GEORGIEV, Tz. et al. Crustal motion and strain accumulation in western Bulgaria. *Tectonophysics*, Vol 413, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 2006, p. 127–145.
- 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).
- ATKOČIŪNAS, J.; NAGEVIČIUS, J. *Fundamentals of Elasticity Theory* (Tamprumo teorijos pagrindai). Vilnius: Technika, 2004. 528 p. (in Lithuanian).
- ČYRAS, A. *Structural Mechanics* (Statybinė mechanika). Vilnius: Mokslas, 1990. 446 p. (in Lithuanian).
- ESIKOV, N. P. *Tectonophysical Aspects of the Analysis of Recent Movements of the Earth's Crust* (Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности). Novosibirsk: Nauka, 1979. 182 p. (in Russian).
- KASATKIN, B. S.; KUDRIN, A. B.; LOBANOV, L. M. et al. *Experimental Methods of Research of Strains and Stresses* (Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений). Kijev: Naukova Dumka, 1981. 583 p. (in Russian).
- ZAKAREVIČIUS, A. Estimation of the tensors and parameters of the space deformations of the Earth's crust. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVI, No 1. 2000, p. 39–42 (in Lithuanian).
- ZAKAREVIČIUS, A.; STANIONIS, A. The changes of geodynamic stresses of the Earth-crust in the Ignalina nuclear power plant. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXX, No 4, 2004, p. 107–111 (in Lithuanian).
- ANGEVINE, CH. L.; HELLER, P. L.; PAOLA, CH. *Quantitative Sedimentary Basin Modelling*. A. A. P. G. continuing education course note, Series 32, Tulsa, 1990. 133 p.
- LESNE, O.; CALAIS, E.; DEVERCHÈRE, J. Finite element modelling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active–passive rifting debate. *Tectonophysics*, Vol 289, No 4. Elsevier Science Publishers B. V., 1998, p. 327–340.
- STANIONIS, A. *Research of the Earth's Crust Horizontal Movements in the Ignalina Nuclear Power Plant Region by Geodetic Methods*. Summary of Doctoral Dissertation. Vilnius: Technika, 2005. 24 p.
- LIU, Z.; BIRD, P. Two-dimensional and three-dimensional finite element modeling of mantle processes beneath central South Island, New Zealand. *Geophysical Journal International*, Vol 165, No 3. Blackwell Publishing limited, 2006, p. 1003–1028.
- VERNANT, P.; CHÉRY, J. Mechanical modelling of oblique convergence in the Zagros, Iran. *Geophysical Journal International*, Vol 165, No 3. Blackwell Publishing limited, 2006, p. 991–1002.
- ZAKAREVIČIUS, A.; STANIONIS, A.; ŠLIAUPA, S.; STEPHENSON, R. Crustal deformations of the GPS polygon of the Ignalina NPP: application of finite element modelling for geodynamic implications. In *The 6th Intern Conference "Environmental Engineering" Selected Papers*, Vol II. Vilnius: Technika, 2005, p. 1041–1047.
- ZADRO, M.; BRAITENBERG, C. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth–Science Reviews*, Vol 47, Numbers 3–4. Elsevier Science Publishers B. V., 1999, p. 151–187.
- AKSAMITAUSKAS, Č.; PETROŠKEVIČIUS, P.; ZAKAREVIČIUS, A.; STANIONIS, A. Geodetic measurements for the estimation of eco-geodynamic risks in the area of the Ignalina nuclear power plant. In *33^e Symposium International FESF Strasbourg*, Recent Developments in Environmental Protection, Vol 40. Bern: Peter Lang AG, European Academic Publishers, 2005, p. 237–251.
- Ignalina control network, Lithuania – second campaign. Final report. Rambøll, Sept 2000. 64 p.
- ZAKAREVIČIUS, A.; STANIONIS, A. Determination of spatial strains of the earth crust using GPS measurements. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXXII, No 4. Vilnius: Technika, 2006, p. 88–91 (in Lithuanian).
- ZAKAREVIČIUS, A. *The investigation of present vertical Earth crust's movements in the territory of Lithuania* (Dabartinių vertikalųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas). Vilnius: Technika, 1994. 276 p. (in Lithuanian).

Algimantas ZAKAREVIČIUS. Professor, Doctor Habil. Dept of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania, Ph +370 5 274 4703, e-mail Algimantas.Zakarevicius@ap.vtu.lt.

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 140 publications and 3 monographs.

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

Arminas STANIONIS. Assoc Prof, Doctor. Dept of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania, Ph +370 5 274 4703, e-mail Arminas.Stanionis@ap.vtu.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) (Master of science, 2002). Doctor's degree at VGTU, 2005. Author and co-author of 20 publications.

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