

ŽEMĖS PLUTOS ERDVINIŲ DEFORMACIJŲ NUSTATYMAS TAIKANT GPS MATAVIMŲ DUOMENIS

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*

Įteikta 2006 09 03, priimta 2006 09 21

Santrauka. Erdvinės Žemės plutos deformacijos įvertintos baigtinių elementų metodu, deformacijoms nustatyti sudarytas skaičiavimo algoritmas. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje. Gauti nauji erdviniai Žemės plutos deformacijų parametrai – erdvinės santykinės linijinės bei šlyties deformacijos. Tyrimo rezultatai rodo, kad erdvinėms Žemės plutos deformacijoms būdinga tam tikri dėsninčiai, t. y. Žemės plutos judesiai Ignalinos atominės elektrinės rajone yra diferencijuoti pagal blokus – šiaurinį ir pietinį.

Reikšminiai žodžiai: baigtinių elementų metodas, erdvinės Žemės plutos deformacijos, GPS.

1. Įvadas

Vertikalieji ir horizontalieji Žemės plutos judesiai paprastai nagrinėjami atskirai.

Horizontaliosios Žemės deformacijos ir jų savybės tam tikroje teritorijoje tiriamos analizuojant geodezinių tinklų punktų koordinacijas ar kitų elementų pokyčius, nustatytus atliekant kartotinius geodezinius matavimus [1–6]. Pagal šiuos duomenis galima apibūdinti horizontaliąsias Žemės plutos deformacijas, atsiradusias per laiko intervalą tarp kartotinių matavimų, nustatyti jų pobūdį. Kadangi geodezinių tinklų elementų pokyčiai yra susiję su tinklo punktų tarpusavio padėties pakeitimais, tai pradiniai duomenys Žemės plutos deformacijoms nustatyti gaunami apdorojant geodezinių tinklų matavimų rezultatus.

Vertikaliųjų Žemės plutos deformacijų charakteristikos dažniausiai įvertinamos taikant niveliacijos metodu gautus matavimo rezultatus [7].

Tačiau pastaruoju metu, taikant naujas geodezinių tinklų matavimų technologijas, dažniausiai globalinės padėties nustatymo sistemas (GPS), galima sudaryti didelio tikslumo erdvinius geodezinius tinklus. Turint tokių tinklų kartotinių matavimų duomenis įmanoma įvertinti erdvinės Žemės plutos deformacijas. Pirmosios tokios rekomendacijos pateiktos [8] darbe.

Darbo tikslas – sudaryti erdviniai Žemės plutos deformacijų įvertinimo algoritmą, erdvinės deformacijos įvertinant baigtinių elementų metodu tenzorinės analizės būdu, bei apskaičiuoti Žemės plutos erdviniai deformacijų parametrus Ignalinos atominės elektrinės rajone.

Tyrimams atlikti pasirinktas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas, nes elektrinė pastatyta stambiųjų tektoninių struktūrų Mozūrijos – Baltarusijos

anteklizės, 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 [9].

2. Erdvinių deformacijų skaičiavimo metodika

Erdvinės Žemės plutos deformacijų charakteristikas galima įvertinti mažiausiųjų kvadratų metodu [10], taikant laisvojo taškų poslinkio tolygiai besideformuojančioje trimatėje erdvėje modelį [11].

Taškų poslinkių modelis

$$\Delta E = H \cdot T, \quad (1)$$

čia

$$\Delta E = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Z_1 \\ \vdots \\ \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ \vdots \\ \Delta X_n \\ \Delta Y_n \\ \Delta Z_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -Y_{S_1} & X_{S_1} & 0 & 0 & Y_{S_1} & Z_{S_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_1} & 0 & Y_{S_1} & 0 & X_{S_1} & 0 & Z_{S_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_1} & 0 & X_{S_1} & Y_{S_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & -Y_{S_i} & X_{S_i} & 0 & 0 & Y_{S_i} & Z_{S_i} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_i} & 0 & Y_{S_i} & 0 & X_{S_i} & 0 & Z_{S_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_i} & 0 & X_{S_i} & Y_{S_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & -Y_{S_n} & X_{S_n} & 0 & 0 & Y_{S_n} & Z_{S_n} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{S_n} & 0 & Y_{S_n} & 0 & X_{S_n} & 0 & Z_{S_n} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{S_n} & 0 & X_{S_n} & Y_{S_n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} \alpha_X \\ \alpha_Y \\ \alpha_Z \\ \omega \\ \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ \varepsilon_{ZZ} \\ \varepsilon_{XY} \\ \varepsilon_{XZ} \\ \varepsilon_{YZ} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

čia ΔE – punktų erdviųjų koordinačių poslinkių vektorius, H – punktų erdviųjų koordinačių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica, T – erdviųjų Žemės plutos deformacijų parametų vektorius.

Į (1–4) įeinančios reikšmės:

$\Delta X_i = X'_i - X_i$, $\Delta Y_i = Y'_i - Y_i$, $\Delta Z_i = Z'_i - Z_i$, X_i , Y_i , Z_i – pirmojo matavimo erdvinės stačiakampės geocentrinės geodezinio tinklo punktų koordinatės, X'_i , Y'_i , Z'_i – antrojo matavimo erdvinės stačiakampės geocentrinės geodezinio tinklo punktų koordinatės, $i=1,2,\dots,n$ – punktų numeriai, X_{S_i} , Y_{S_i} , Z_{S_i} – erdvinio geodezinio tinklo punktų koordinačių nuokrypiai nuo jų vidurkio, α_X , α_Y , α_Z – poslinkiai koordinačių ašių kryptimis, ω – baigtinio elemento posūkis, ε_{XX} , ε_{YY} , ε_{ZZ} – santykinės linijinės deformacijos, ε_{XY} , ε_{XZ} , ε_{YZ} – santykinės šlyties deformacijos.

Mažiausiųjų kvadratų metodu įvertintas erdviųjų deformacijų parametų vektorius [12]

$$T = \left(H^T \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot \Delta E. \quad (5)$$

3. Erdviųjų Žemės plutos deformacijų skaičiavimo rezultatai

Ignalinos atominės elektrinės rajone 1998 m. įrengtas specialus GPS tinklas (žr. punktų išdėstymo schemą). Tinkle yra 10 gruntinių punktų. Jie išdėstyti atsižvelgiant į svarbiausiųjų tektoninių blokų dabartinį tektoninį aktyvumą. Keturi punktai nuo elektrinės nutolę iki 10 km spinduliu, kiti yra kelių dešimčių kilometrų atstumu.

Matavimai geodinaminiam poligone atlikti 1998 ir 1999 m. rugsėjį. Geodinaminio poligono punktų koordinatės nustatytos GPS matavimais [13]. Matuota *ASHTECH Z-Surveyor* ir *Z-12 GPS* prietaisais. Matavimus atliko VGTU ir Danijos firmos „Nellemann & Bjørnkjær“ specialistai. Matavimų programą sudarė 4 sesijos. Vienos sesijos trukmė – 24 valandos. Visas keturias sesijas buvo matuojama 1, 2, 4, 6, 9, 10 gruntiniuose punktuose, o dvi sesijas – 3, 5, 7 ir 8 gruntiniuose punktuose. Matavimų programa pateikta [3, 5, 13] darbuose.

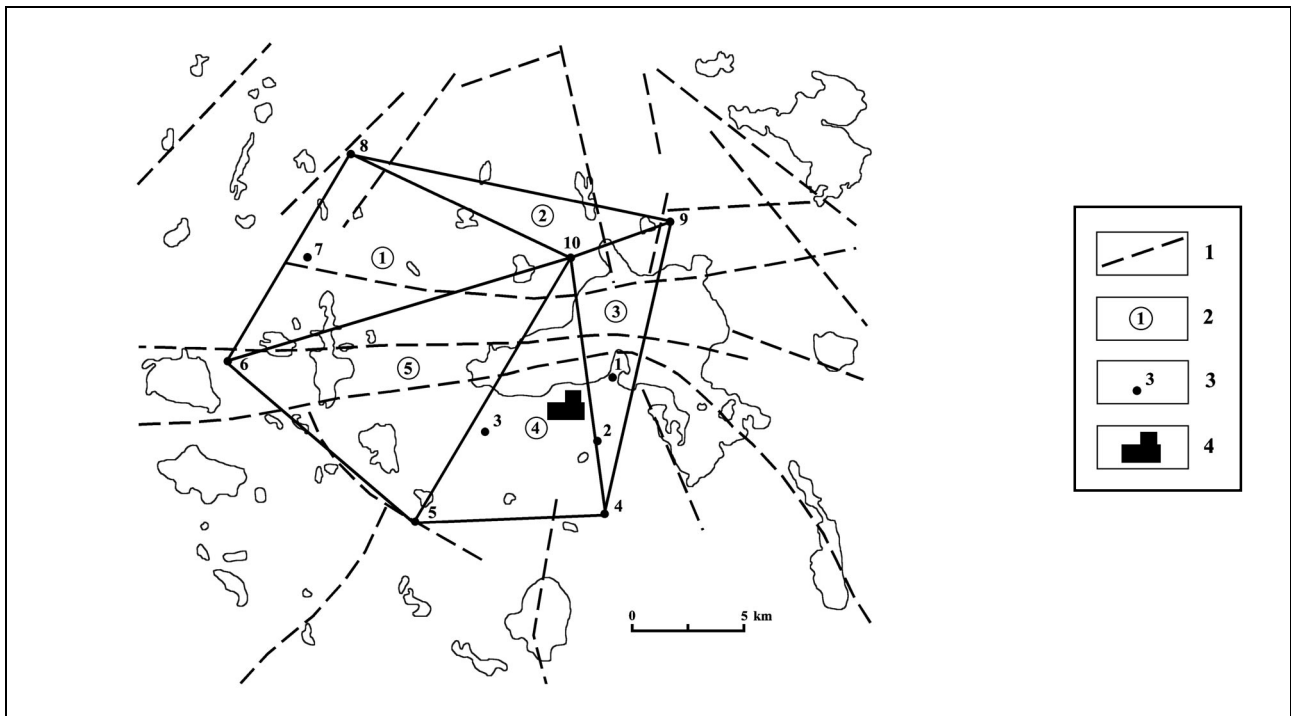
Punktų koordinačių pokyčiai [13], gauti atlikus GPS matavimus 1998 m. rugsėjį ir 1999 m. rugsėjį, pateikti 1 lentelėje.

Pagal (2–5) formules įvertinta penkių geodinaminio poligono trikampių erdviųjų deformacijų parametų kaita (žr. pav.): apskaičiuoti poslinkiai koordinačių ašių kryptimis, posūkiškai, santykinės linijinės bei šlyties deformacijos. Erdviųjų deformacijų parametrai priskiriami baigtinio elemento (trikampio) svorio centrui.

Erdviniai Žemės plutos deformacijų parametrai pagal GPS matavimų duomenis apskaičiuoti naudojantis *Mathcad* programa.

Gautieji erdviųjų Žemės plutos deformacijų parametų vektoriai pateikti 2 lentelėje.

Santykinių linijinių deformacijų ε_{XX} kitimo ribos – nuo $-0,323 \cdot 10^{-6}$ iki $-0,972 \cdot 10^{-6}$, ε_{YY} kinta nuo $-0,125 \cdot 10^{-6}$ iki $0,604 \cdot 10^{-6}$ bei ε_{ZZ} kinta nuo $-0,438 \cdot 10^{-6}$ iki $1,065 \cdot 10^{-6}$ (2 lentelė). Santykinės šlyties deformacijos ε_{XY} kinta nuo $-0,482 \cdot 10^{-6}$ iki $0,517 \cdot 10^{-6}$, ε_{XZ} – nuo $-0,171 \cdot 10^{-6}$ iki $0,650 \cdot 10^{-6}$, ε_{YZ} – nuo $-0,476 \cdot 10^{-6}$ iki $0,645 \cdot 10^{-6}$ (2 lentelė).



Baiginių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje: 1 – tektoniniai lūžiai (sudarė P. Suveizdis), 2 – trikampio numeris, 3 – GPS punktas, 4 – Ignalinos atominė elektrinė
 The location scheme of the network of the finite elements at the Ignalina Nuclear Power Plant: 1 – tectonic breaks (according to P. Suveizdis), 2 – number of triangles, 3 – GPS benchmarks, 4 – Ignalina NPP

1 lentelė. Punktų koordinatų pokyčiai
Table 1. Changes of benchmark coordinates

Punkto Nr.	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	Punkto Nr.	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
1	8	1	1	6	8	2	-3
2	0	1	2	7	11	-2	1
3	1	0	0	8	14	-3	-3
4	1	2	-2	9	7	-1	1
5	3	0	0	10	8	0	0

2 lentelė. Deformacijų parametrai
Table 2. Parameters of deformations

Trikampio Nr.	α_{XX} (m)	α_{YY} (m)	α_{ZZ} (m)	ω''	$\varepsilon_{XX} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{YY} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{ZZ} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{XY} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{XZ} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{YZ} \cdot 10^{-6}$
1	0,0100	-0,0003	-0,0020	0,162	-0,972	0,435	-0,438	0,019	-0,171	0,213
2	0,0097	-0,0013	-0,0007	0,216	-0,323	0,604	1,065	0,517	0,650	0,645
3	0,0053	0,0003	-0,0003	0,117	-0,358	0,130	0,770	-0,145	0,048	0,296
4	0,0040	0,0007	-0,0007	0,049	-0,796	0,174	-0,094	-0,482	-0,133	-0,476
5	0,0063	0,0007	-0,0010	0,067	-0,658	-0,125	-0,049	-0,173	-0,052	0,314

Remiantis tyrimų rezultatais (2 lentelė) Ignalinos atominės elektrinės rajone pastebimi tam tikri erdviniai Žemės plutos judesių pasiskirstymo dėsningumai. Jie yra susiję su teritorijos tektonine sandara.

Poslinkiai α_{XX} yra teigiami, poslinkiai α_{YY} pasiskirsto pagal beveik paralelės kryptimi einantį ir rytinėje poligono dalyje į pietryčius pasisukantį

kristalinio pamato Drūkšių lūžį, t. y. šiauriniame bloke poslinkiai neigiami (1 ir 2 trikampiai), o pietiniame – teigiami (3, 4 ir 5 trikampiai), α_{ZZ} – neigiami. Santykinės linijinės deformacijos ε_{XX} yra neigiamo ženklo, ε_{YY} – teigiamos (išskyrus 5 trikampį). Santykinės šlyties deformacijos ε_{XY} pasiskirsto pagal blokus,

nustatytus vertikaliųjų judesių tyrimais [4], t. y. šiauriniame bloke deformacijos yra teigiamos, pietiniame – neigiamos.

Turint geodezinio tinklo erdvinės deformacijas galima įvertinti erdvinius geodezinių tinklų įtempių pokyčius.

Taikant siūlomą skaičiavimo metodiką erdvinėms Žemės plutos deformacijoms nustatyti gali būti panaudoti kartotiniai horizontaliųjų bei vertikaliųjų geodezinių tinklų matavimų duomenys, t. y. plokštuminio geodezinio tinklo punktų koordinacių bei tų pačių punktų aukščių pokyčiai.

4. Išvados

1. Sudarytas erdvinių Žemės plutos deformacijų skaičiavimo algoritmas, deformacijas įvertinant baigtinių elementų metodu tenzorinės analizės būdu, bei atlikti eksperimentiniai skaičiavimai Ignalinos atominės elektrinės rajone pagal geodezinių matavimų duomenis.

2. Gauti nauji erdvinių Žemės plutos deformacijų parametrai – apskaičiuoti poslinkiai koordinacių ašių kryptimis, trikampio posūkiai, erdvinės santykinės linijinės bei šlyties deformacijos.

3. Tyrimų rezultatai koreliuoja su anksčiau atliktų vertikaliųjų bei horizontaliųjų judesių tyrimų Ignalinos atominės elektrinės rajone duomenimis. Poligono teritorijoje Žemės plutos judesiai išsiskiria pagal beveik paralelės kryptimi einantį ir rytinėje poligono dalyje į pietryčius pasisukantį kristalinio pamato Drūkšių lūžį, t. y. skirtingais būdais atliktų tyrimų rezultatai atspindi tuos pačius dėsningumus.

Literatūra

1. Hamdy, A. M.; Park, P. H.; Lim, H. C. Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data, 2000–2003. *Earth Planets and Space*, Vol 57, No 2. Terra Scientific Publishing Company, 2005, p. 77–82.
2. Kaiser, A.; Reicherter, K.; Hübscher, C.; Gajewski, D. Variation of the present-day stress field within the North German Basin—insights from thin shell FE modeling based on residual GPS velocities. *Tectonophysics*, Vol 397, No 1–2. Elsevier Science Publishers B. V., 2005, p. 55–72.
3. 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.
4. 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).
5. Zakarevičius, A.; Aksamitauskas, Č.; Stanionis, A. Modelling of the horizontal strains and stresses of the Earth-crust according to the data of geodetic measurements. *Geodetski vestnik*, Vol 49, No 2. Ljubljana, 2005, p. 191–207.

6. 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).
7. Zakarevičius, A. The investigation of present vertical Earth crust's movements in the territory of Lithuania (Dabartinių vertikaliųjų Žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas). Vilnius: Technika, 1994. 276 p. (in Lithuanian).
8. 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).
9. Tectonic structure of Lithuania (Lietuvos tektoninė sandara). Compiled and edited by P. Suveizdis. Institute of Geology and Geography, Vilnius, 2003. 160 p. (in Lithuanian).
10. Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. The finite element method. Vol 1. Fifth edition. Butterworth-Heinemann, 2000. 689 p.
11. Niemeier, W.; Rennen, M.; Salbach, H. Bestimmung der regionaler und globaler Deformationen im Bereich der Antarktischen Halbinsel. Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Heft Nr. 310. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, 2000, S. 109–126.
12. 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).
13. Ignalina control network, Lithuania – second campaign. Final report. Rambøll, September 2000. 64 p.

Algimantas ZAKAREVIČIUS. Professor, Doctor Habil. Dept of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania (tel. +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. Associate Professor, Doctor. Dept of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania (tel. +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 18 publications.

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