

IGNALINOS ATOMINĖS ELEKTRINĖS REGIONO EKOGEODINAMINĖS RIZIKOS VERTINIMAS PAGAL GPS MATAVIMŲ DUOMENIS

Daiva Levinskaitė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. pašta daiva.levinskaite@gmail.com

Anotacija. Nagrinėjamos Žemės plutos erdvinės deformacijos, nustatomi Žemės plutos erdviųjų geodinaminių įtempių pokyčiai Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje pagal GPS matavimų duomenis. Pateikta Žemės plutos erdviųjų deformacijų ir geodinaminių įtempių pokyčių skaičiavimo metodika. Atlikus tyrimus pagal pateiktą Žemės plutos erdviųjų deformacijų ir geodinaminių įtempių skaičiavimo metodiką, gauti nauji erdviųjų deformacijų charakteristikų bei tektoninių įtempių pokyčių rezultatai. Erdvinės deformacijos kinta nuo $-3,005 \cdot 10^{-6}$ iki $1,065 \cdot 10^{-6}$ bei geodinaminių įtempių pokyčiai kinta nuo $-0,2065$ MPa iki $0,0976$ MPa.

Reikšminiai žodžiai: baigtinių elementų metodas, erdviųjų geodinaminių įtempių pokyčiai, erdvinės deformacijos, GPS.

Įvadas

Atsiradus tiksliems geodeziniams prietaisams labai pagerėjo geodezinių matavimų kokybė ir tikslumas. Šiuo metu galima sudaryti erdviuosius geodezinius tinklus ir atlikti ypač precizinius matavimus (Zakarevičius 2003; Kaiser *et al.* 2005; Hsu, Li 2004). Naudojant kartotinių geodezinių matavimų duomenis, galima gana tiksliai įvertinti geodezinių tinklų punktų koordinatinių pokyčius ir kitas jų charakteristikas. Turint punktų koordinatinių pokyčių rezultatų duomenis, galima įvertinti dabartinių Žemės plutos judesių charakteristikas bei nustatyti jų kaitos dėsninumus. Gauti rezultatai teiks papildomą informaciją apie Žemės plutos seisminį intensyvumą bei palengvins dabartinių Žemės plutos judesių interpretavimą.

Tyrimų tikslas – įvertinti erdvinės deformacijas pagal sudarytą erdviųjų Žemės plutos deformacijų įvertinimo algoritmą bei nustatyti Žemės plutos erdviųjų geodinaminių įtempių pokyčius tenzorinės analizės būdu, tenzorius komponentes įvertinant baigtinių elementų metodu pagal geodezinių matavimų rezultatus Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje.

Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas

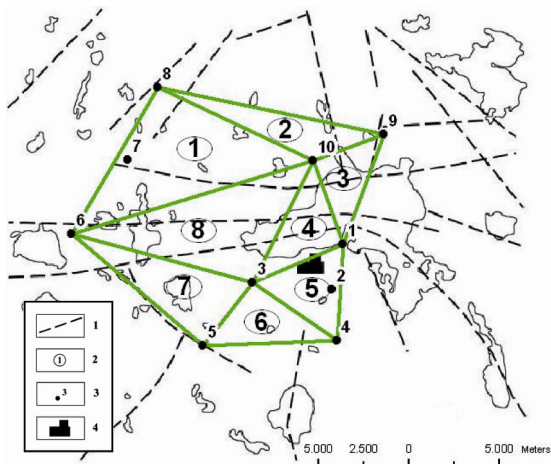
Renkant Ignalinos atominės elektrinės statybos vietą, nepakankamai įvertinta teritorijos ekogeodinaminė rizika. Šio rajono geologinės ir tektoninės sąlygos yra sudėtingos, nes elektrinė pastatyta stambiųjų Rytų Europos platformos regioninių struktūrų Latvijos balno ir Mozūrijos–Baltarusijos anteklizės sandūroje. Žemės plutos jude-

sių monitoringas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminiam poligone itin svarbus įvertinant Ignalinos atominės elektrinės apylinkių seismingumą. Tam tikslui Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje erdvinėms deformacijoms ir geodinaminiam įtempimui tirti įrengtas specialus GPS tinklas (Zakarevičius 2003). Tinkle yra 10 gruntinių punktų, kurie išdėstyti atsižvelgiant į svarbiausių tektoninių blokų dabartinį tektoninį aktyvumą. Matavimai geodinaminiam poligone atlikti 1998 ir 1999 m. rugsėjį, atliekant priverstinį prietaiso centravimą. Geodinaminio poligono punktų koordinatės nustatytos 8 GPS (*ASHTECH Z-Surveyor* ir *Z-12 GPS*) prietaisais. Matavimus atliko Vilniaus Gedimino technikos universitetas (VGTU) ir Danijos firmos „Nellemann & Bjornkar“. Matavimų programą sudarė keturios sesijos po 24 valandas (nenutrūkstamai 4 paras). Visas keturias sesijas buvo matuojama 1, 2, 4, 6, 9, 10 punktuose, o dvi sesijas – 3, 5, 7 ir 8 punktuose (Zakarevičius 2003). Baigus matuoti, Ignalinos atominės elektrinės tinklas buvo susietas su valstybiniu GPS pirmosios ir antrosios klasės tinklu. Matavimų duomenys apdoroti VGTU Geodezijos institute ir Danijos firmoje „Nellemann & Bjornkar“, naudojant programinius paketus GPPS ir FILLNET (Zakarevičius, Stanionis 2006; Petroškevičius 2004; Skeivalas 2008). Apdorojus matavimų duomenis nustatyta, kad vidutinės kvadratinės poligono stygų matavimo paklaidos yra 0,3–2,4 mm. Punktų koordinatinių vidutinės kvadratinės paklaidos yra ne didesnės kaip 1,2 mm.

Iš 10 gruntinių punktų, kurių koordinatės nustatytos GPS matavimais, suformuota kartotinių matavimų tinklo schema erdvinėms deformacijoms skaičiuoti ir geodina-

miniams įtempiams nustatyti (1 pav.). Pagal kartotinių matavimų duomenis sudaryti trikampiai, kurie laikomi kaip baigtiniai elementai.

Ekogeodinaminio poligono punktų koordinacių pokyčiai pateikti 1 lentelėje.



1 pav. Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baigtinių elementų tinklo Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje schema: 1 – tektoniniai lūžiai (sudarė P. Surveizdis); 2 – trikampio numeris; 3 – GPS punktas; 4 – Ignalinos atominė elektrinė

Fig. 1. The location scheme of the tectonic breaks and network of finite elements at the Ignalina nuclear Power Plant: 1 – tectonic breaks (according to P. Surveizdis); 2 – number of triangles; 3 – GPS points; 4 – Ignalina NPP

1 lentelė. Punktų koordinacių pokyčiai

Table 1. Coordinates of points changes

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

Erdvinių deformacijų ir geodinaminio įtempio skaičiavimo metodika

Žemės plutos judesių deformacijų parametrus galima apskaičiuoti baigtinio elemento plotui. Sudarant baigtinių elementų tinklą trikampaiais, ne visuomet galima tiksliai ir detalai atsižvelgti į tiriamojo regiono tektoninės sandaros savybes bei ypatumus, jei to nebuvo atlikta projektuojant ir įrengiant geodezinio tinklo gruntinius punk-

tus. Tada baigtinių elementų tinklas modeliuojamas įtraukiant ir kitas daugiakampes geometrines figūras arba blokines struktūras.

Erdvines Žemės plutos deformacijų charakteristikas galima įvertinti mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant laisvojo taškų poslinkio tolygiai besideformuojančioje trimatėje erdveje modelį (Zakarevičius, Stanionis 2006).

Taškų poslinkių modelis:

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

čia: ΔE – punktų erdviųjų koordinacių poslinkių vektorius; H – punktų erdviųjų koordinacių nuokrypių nuo jų vidurkio matrica; T – erdviųjų Žemės plutos deformacijų parametrų vektorius (Zakarevičius, Stanionis 2006), čia

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

$$H = \begin{pmatrix} X_{S_1} & 0 & 0 & Y_{S_1} & Z_{S_1} & 0 \\ 0 & Y_{S_1} & 0 & X_{S_1} & 0 & Z_{S_1} \\ 0 & 0 & Z_{S_1} & 0 & X_{S_1} & Y_{S_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{S_2} & 0 & 0 & Y_{S_2} & Z_{S_2} & 0 \\ 0 & Y_{S_2} & 0 & X_{S_2} & 0 & Z_{S_2} \\ 0 & 0 & Z_{S_2} & 0 & X_{S_2} & Y_{S_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{S_3} & 0 & 0 & Y_{S_3} & Z_{S_3} & 0 \\ 0 & Y_{S_3} & 0 & X_{S_3} & 0 & Z_{S_3} \\ 0 & 0 & Z_{S_3} & 0 & X_{S_3} & Y_{S_3} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$T = (\varepsilon_{XX} \quad \varepsilon_{YY} \quad \varepsilon_{ZZ} \quad \varepsilon_{XY} \quad \varepsilon_{XZ} \quad \varepsilon_{YZ})^T. \quad (4)$$

Į (2–4) formules 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 geo-

centrinės geodezinio tinklo punktų koordinatės; $i = 1, 2, \dots, n$ – punktų numeriai; $X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i}$ – erdvinio geodezinio tinklo punktų koordinatėms nuokrypiai nuo jų vidurio; $\varepsilon_{XX}, \varepsilon_{YY}, \varepsilon_{ZZ}$ – santykinės linijinės deformacijos; $\varepsilon_{XY}, \varepsilon_{XZ}, \varepsilon_{YZ}$ – santykinės šlyties deformacijos.

Mažiausiųjų kvadratų metodu įvertintas erdviųjų deformacijų parametrų vektorius (Zakarevičius, Stanionis 2006):

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

Erdviniams geodinaminiamis įtempimams modeliuoti gali būti pritaikytas atvirkštinis Huko (Hooke) dėsnis, įtempius išreiškus deformacijomis (Zakarevičius, Stanionis 2007; Atkočiūnas, Nagevičius 2004):

$$\begin{cases} \sigma_{XX} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{XX} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), \\ \sigma_{YY} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{YY} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), \\ \sigma_{ZZ} = 2G \cdot \left(\varepsilon_{ZZ} + \frac{\nu \cdot \vartheta}{1-2\nu} \right), \\ \sigma_{XY} = 2G \cdot \varepsilon_{XY}, \\ \sigma_{XZ} = 2G \cdot \varepsilon_{XZ}, \\ \sigma_{YZ} = 2G \cdot \varepsilon_{YZ}, \end{cases} \quad (6)$$

čia: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – šlyties modulis; E – tamprumo modulis $\left(7 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2} \right)$; $\vartheta = \varepsilon_{XX} + \varepsilon_{YY} + \varepsilon_{ZZ}$ – pirmasis deformacijų tenzoriaus invariantas I_1 , ν – Puasono koeficientas (0,25); $\sigma_{XX}, \sigma_{YY}, \sigma_{ZZ}$ – normaliniai geo-

dinaminiai įtempiai; $\sigma_{XY}, \sigma_{XZ}, \sigma_{YZ}$ – tangentiniai geodinaminiai įtempiai (Zakarevičius, Stanionis 2007).

Erdvinių deformacijų ir geodinaminųjų įtempimų skaičiavimo rezultatai

Pagal (2–5) formules įvertinta Ignalinos atominės elektrinės regiono teritorijoje geodinaminio poligono baigtinių elementų (trikampių) tinklo (1 pav.) erdviųjų deformacijų parametrų ir geodinaminųjų įtempimų pokyčių kaita: apskaičiuotos santykinės linijinės bei šlyties deformacijos, normaliniai ir tangentiniai geodinaminųjų įtempimų pokyčiai. Erdvinių deformacijų parametrai ir geodinaminųjų įtempimų pokyčiai priskiriami baigtinio elemento (trikampio) svorio centrui.

Gautieji erdviųjų Žemės plutos deformacijų parametrai ir geodinaminųjų įtempimų pokyčiai pateikti 2 ir 3 lentelėse.

Santykinių linijinių deformacijų ε_{XX} kitimo ribos yra nuo $-2,674 \cdot 10^{-6}$ iki $0,181 \cdot 10^{-6}$, ε_{YY} kinta nuo $-0,007 \cdot 10^{-6}$ iki $0,604 \cdot 10^{-6}$ bei ε_{ZZ} kinta nuo $-1,393 \cdot 10^{-6}$ iki $1,065 \cdot 10^{-6}$. Santykinės šlyties deformacijos ε_{XY} kinta nuo $-0,924 \cdot 10^{-6}$ iki $0,517 \cdot 10^{-6}$, ε_{XZ} – nuo $-1,582 \cdot 10^{-6}$ iki $0,650 \cdot 10^{-6}$, ε_{YZ} – nuo $-0,552 \cdot 10^{-6}$ iki $0,645 \cdot 10^{-6}$ (2 lentelė).

Geodinaminio poligono tinklo erdviųjų normalinių įtempimų pokyčių σ_{XX} kitimo ribos nuo $-0,2605$ MPa iki $-0,0274$ MPa, σ_{YY} kinta nuo $-0,1054$ MPa iki $0,0167$ MPa, o σ_{ZZ} – nuo $-0,2581$ MPa iki $0,0409$ MPa (3 lentelė). Erdviniai geodinaminiai tangentiniai įtempimų pokyčiai: σ_{XY} kinta nuo $-0,0259$ MPa iki $-0,0006$ MPa, σ_{XZ} – nuo $-0,0443$ MPa iki $0,0020$ MPa, σ_{YZ} – nuo $-0,0155$ MPa iki $0,0092$ MPa.

2 lentelė. Erdvinių Žemės plutos deformacijų parametrai

Table 2. Parameters of Earth's crust spatial deformations

Trikampio Nr.	$\varepsilon_{XX} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{YY} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{ZZ} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{XY} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{XZ} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{YZ} \cdot 10^{-6}$
1	-0,972	0,435	-0,438	0,019	-0,171	0,213
2	-0,323	0,604	1,065	0,517	0,650	0,645
3	0,181	0,080	0,033	0,203	0,008	0,289
4	-1,786	-0,007	-0,425	-0,924	-0,889	-0,514
5	-2,674	0,111	-1,393	-0,313	-1,582	-0,552
6	-0,489	0,299	0,188	-0,042	-0,046	-0,272
7	0,076	-0,278	-3,005	-0,682	-1,189	-0,366
8	-1,287	-0,116	-0,158	-0,418	-0,135	0,229

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	-0,0029	-0,0518	0,0005	-0,0048	0,0060
2	0,0196	0,0715	0,0973	0,0145	0,0182	0,0181
3	0,0184	0,0127	0,0101	0,0057	0,0002	0,0081
4	-0,1621	-0,0625	-0,0859	-0,0259	-0,0249	-0,0144
5	-0,2605	-0,1046	-0,1888	-0,0088	-0,0443	-0,0155
6	-0,0274	0,0167	0,0105	-0,0012	-0,0013	-0,0076
7	-0,0855	-0,1054	-0,2581	-0,0191	-0,0333	-0,0102
8	-0,1158	-0,0502	-0,0526	-0,0117	-0,0038	0,0064

Išvados

1. Santykinės linijinės deformacijos ϵ_{XX} yra neigiamo ženklo (išskyrus 3 ir 7 trikampius), ϵ_{YY} – teigiamos (išskyrus 4, 7, 8 trikampius). Santykinės šlyties deformacijos ϵ_{XY} yra neigiamos (išskyrus 2, 3, 6 trikampius).

2. Erdvinių geodinaminių įtempių pokyčiai σ_{XX} yra neigiamo ženklo, σ_{YY} , σ_{ZZ} – neigiamo ženklo (išskyrus 2 ir 5 trikampius), σ_{XY} yra neigiamo ženklo, σ_{XZ} ir σ_{YZ} yra teigiamo ženklo 1 ir 2 trikampiuose, neigiamo – 3–6 trikampiuose.

3. Gautieji tyrimo rezultatai koreliuoja su ankstesnių vertikalųjų bei horizontaliųjų judesių tyrimų rezultatais ir teikia papildomą informaciją atliekant Ignalinos atominės elektrinės rajono ekogeodinaminės rizikos vertinimą.

Padėkos

Dėkoju prof. habil. dr. Algimantui Zakarevičiui ir doc. dr. Arminui Stanioniui už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. 2004. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vilnius: Technika. 528 p.

Hsu, R.; Li, S. 2004. Decomposition of deformation primitives of horizontal geodetic networks: application to Taiwan’s GPS network, *Journal of Geodesy* 78: 251–262.
doi:10.1007/s00190-004-0399-9

Kaiser, A.; Reicherter, K.; Hübscher, C.; Gajewski, D. 2005. Variation of the present-day stress field within the North German Basin– insights from thin shell FE modeling based on residual GPS velocities, *Tectonophysics* 397(1–2): 55–72.
doi:10.1016/j.tecto.2004.10.009

Petroškevičius, P. 2004. *Gravitacijos lauko poveikis geodeziniam matavimams*. Vilnius: Technika. 292 p.

Skeivalas, J. 2008. *GPS tinklų teorija ir praktika*. Vilnius. 288 p.

Zakarevičius, A. 2003. *Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas*. Vilnius. 195 p.

Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2006. Žemės plutos erdviųjų deformacijų nustatymas taikant GPS matavimų duomenis, *Geodezija ir kartografija* 32(4): 88–91.

Zakarevičius, A.; Stanionis, A. 2007. Erdvinių geodinaminių įtempių tyrimas pagal geodezinių matavimų rezultatus, *Geodezija ir kartografija* 33(1): 21–25.

ESTIMATION OF ECO-GEODYNAMIC RISK IN THE REGION OF THE IGNALINA NUCLEAR POWER PLANT USING GPS DATA

D. Levinskaitė

Summary

The purpose of this work is to appreciate spatial strains and stresses in the territory of Ignalina nuclear power plant region using data on geodetic observation. The methodology of calculating Earth’s crust spatial strains and changes in stresses is submitted. The obtained results reveal the new parameters of spatial strains and changes in geodynamic stress in the territory of Ignalina nuclear power plant region. Spatial strains vary from $-3,005 \cdot 10^{-6}$ to $1,065 \cdot 10^{-6}$ and changes in geodynamic stress from $-0,2065$ MPa to $0,0976$ MPa.

Keywords: finite element method, changes of spatial geodynamic stresses, spatial deformations, GPS.