

UDK 528.389

HORIZONTALIŲJŲ ŽEMĖS PLUTOS POSLINKIŲ IR DEFORMACIJŲ MODELIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

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

[teikta 2004 01 09, priimta 2004 03 29]

Santrauka. Išnagrinėta dabartinių horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų modeliavimo baigtinių elementų metodu teoriniai pagrindai ir praktinio taikymo galimybės. Žemės plutos deformacijų modeliavimas baigtinių elementų metodu pagal geodezinių matavimų duomenis, modeliui realizuoti taikant *Ansys* programinį paketą, atliktas Ignalinos atominės elektrinės rajone. Iš rezultatų analizės daroma išvada, kad baigtinių elementų metodu sudarytas deformacijų modelis detalizuoja tiriamojo rajono dabartinio tektoninio aktyvumo struktūrą ir praplečia matavimo rezultatų geotektoninio interpretavimo galimybes. Nustatyta, kad Ignalinos atominės elektrinės rajone horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų struktūra siejasi su tektoninėmis teritorijos ypatybėmis. Atlikti tyrimai parodo Žemės plutos deformacijų modeliavimo baigtinių elementų metodu privalumus, palyginti su kitais metodais, ir *Ansys* programinio paketo taikymo geodinaminiais tyrimams galimybes.

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

1. Įvadas

Tiriant horizontaliuosius Žemės plutos judesius geodeziniais metodais, pagal kartotinių geodezinių matavimų rezultatus nustatomi geodezinio tinklo punktų poslinkiai. Geodezinių punktų poslinkiai sutapatinami su Žemės plutos poslinkiais. Tokiu būdu nustatomos Žemės plutos poslinkių skaitinės reikšmės tik pavieniuose retai išsidėsčiusiuose taškuose. Kituose taškuose poslinkių reikšmės paprastai nustatomos atliekant geometrinį interpoliavimą, dažniausiai taikant tiesinio interpoliavimo procedūras. Toks horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymo būdas turi nemažai trūkumų.

Svarbiausi iš jų yra tai, kad tokių poslinkių vektoriai priklauso nuo pradinių taškų pasirinkimo, gaunamas retai išsidėsčiusių taškų tinklas, kuris tik bendrais bruožais atspindi vykstantį fizinių procesą; Žemės plutos judesių ne geodeziniuose punktuose reikšmės nustatant geometriškai interpoliuojant, neįvertinamos mechaninės deformuojamo kūno savybės, t. y. mechaninis deformacijų modelis.

Rezultatų nevienareikšmiškumas dėl pradinių taškų pasirinkimo panaikinamas remiantis tenzorine deformacijų analizės metodika [1–6]. Kai deformacijų interpoliavimas atliekamas nesutampančiuose su geodezinio tinklo punktais taškuose, tikslesnį bendrą deformacijų vaizdą būtų galima gauti taikant mechaninius deformacijų modelius. Derinant tenzorinės analizės būdą su mechaniniais fizinių kūnų deformacijų modeliais, galima gauti rezultatus, invariantiškus koordinatinių sistemoms bei įvertinančius mechaninius deformuojamo kūno dėsningumus.

Fiziniais deformuojamųjų kūnų modeliams sudaryti

mechanikoje plačiai taikomi baigtinių elementų metodai [7–10].

Šio darbo tikslas – išnagrinėti baigtinių elementų metodo taikymą horizontaliosioms Žemės plutos deformacijoms modeliuoti.

Baigtinių elementų metodu atliktas horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų modeliavimas Ignalinos atominės elektrinės rajone.

2. Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų skaičiavimo metodika

Turint geodezinio tinklo punktų plokščiąsias koordinates (x, y) ir pagal kartotinių matavimų duomenis apskaičiuotus geodezinio tinklo koordinatinių poslinkius $\Delta x, \Delta y$, Žemės plutos horizontaliąsias deformacijas galima aprašyti antrojo rango tenzoriumi [1, 4, 5]:

$$\|T\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

čia

$$\begin{aligned} u &= \Delta x = u(x, y), \\ v &= \Delta y = v(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

u, v – koordinatinių poslinkiai, išreikšti tiesinėmis koordinatinių funkcijomis Dekarto koordinatinių sistemoje.

Tenzorius (1) sudarytas iš simetrinės ir nesimetrinės dalies [1, 2, 4, 5, 11]:

$$\|T\| = \|A\| + \|W\|, \quad (3)$$

$$\|A\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \frac{1}{2}\varepsilon_{12} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$\|W\| = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\omega_{xy} \\ \frac{1}{2}\omega_{xy} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) & 0 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

čia ε_{xx} , ε_{yy} – santykinės linijinės deformacijos, ε_{xy} – santykinės šlyties deformacijos; ω_{xy} , ω_{yx} – baigtinio elemento posūčiai. Koeficientai $\frac{1}{2}$ prie šlyties deformacijų formaliai reikalingi tam, kad pereinant nuo vienos koordinačių sistemos prie kitos koordinačių sistemos deformacijų tenzoriaus $\|A\|$ elementai būtų perskaičiuojami pagal tas pačias, kaip ir įtempimų tenzoriaus komponentai, formules [12].

Kaip matyti (4) formulėje, tarp Žemės plutos deformacijų

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{xy}]^T \quad (6)$$

ir poslinkių

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

vektorių komponentų egzistuoja ryšys.

Bendroju atveju horizontalioje plokštumoje ties deformuojamo kūno tašku deformacijas ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} su poslinkiais u , v sieja trys geometrinės (Koši) lygtys [12]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{cases} \quad (8)$$

Operatorine-matricine forma Koši geometrinės lygtys užrašomos [12]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla^T \cdot \mathbf{u}, \quad (9)$$

čia ∇ – Hamiltono operatorius.

Transponuotas Hamiltono operatorius [12]:

$$\nabla^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Svarbiausiosios horizontaliosios deformacijos apskaičiuojamos iš kvadratinės lygties [3, 4, 12]:

$$\lambda^2 - I_1 \cdot \lambda + I_2 = 0, \quad (11)$$

kuri gaunama išskleidus determinantą [7, 12]:

$$\det \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - \lambda & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} - \lambda \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} - \lambda & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (12)$$

$$I_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}, \quad (13)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix}, \quad (14)$$

čia λ – svarbiausiosios deformacijos, I_1 , I_2 – deformacijų tenzoriaus invariantai.

Išsprendus kvadratinę lygtį (11) gaunamos dvi tikrosios šaknys – λ_1 , λ_2 ($\lambda_1 \geq \lambda_2$), t. y. λ_1 – didžiausias santykinis pailgėjimas, λ_2 – mažiausias santykinis pailgėjimas.

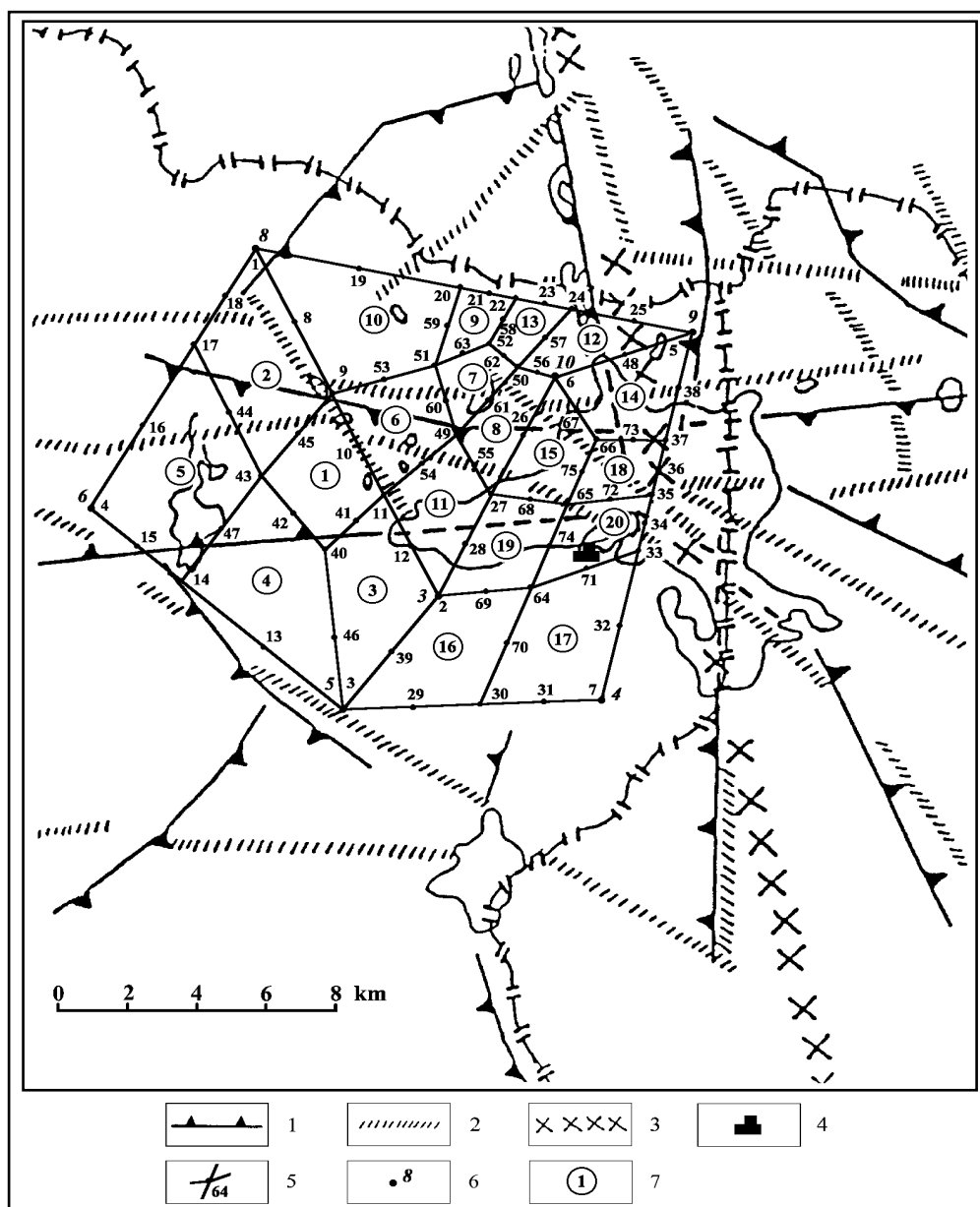
3. Žemės plutos horizontaliųjų poslinkių ir deformacijų 2-D modeliavimas baigtinių elementų metodu

Pagal pateiktą horizontaliųjų deformacijų skaičiavimo metodiką horizontaliesiems Žemės plutos poslinkiams ir deformacijoms modeliuoti sudarytas dviejų dimensijų (2-D) geometrinio kūno modelis. Taikytas baigtinių elementų metodas, darant prielaidą, kad pasirinktų riboto dydžio baigtinių elementų deformacijų pobūdis yra izotropinis. Modeliavimas atliktas naudojantis *Ansys* programa [7].

Praktiniu pavyzdžiu horizontaliosioms deformacijoms ir poslinkiams modeliuoti pasirinktas Ignalinos atominės elektrinės geodinaminis poligonas. Poligono struktūra, matavimų metodika bei rezultatai pateikti [13, 14] darbuose.

Horizontaliųjų poslinkių dviejų dimensijų (2-D) modeliui sudaryti parinkti septyni gruntiniai punktai, kuriuose pakartotinai atlikti GPS matavimai. Remiantis šiais punktais suformuotas baigtinių elementų tinklas, kurį sudaro 20 keturkampių (1 pav.).

Geodinaminio poligono punktų koordinatės nustatytos GPS matavimais 1998 ir 1999 metais (1 lentelė), ši pradinė geodezinių matavimų informacija panaudota horizontaliosioms deformacijoms bei



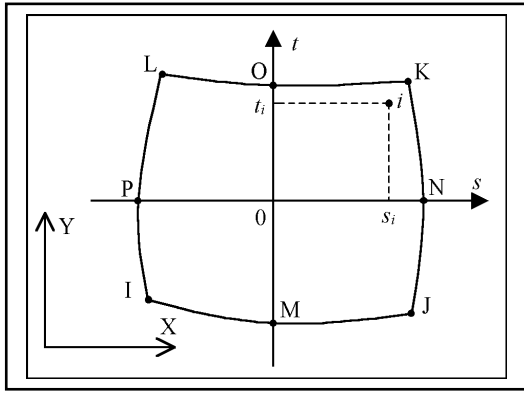
1 pav. Tektoninių lūžių išsidėstymo ir baiginių elementų tinklo schema Ignalinos atominės elektrinės rajono teritorijoje. Tektoniniai lūžiai (pagal I. Juknelį, V. Marcinkevičių, I. Šeštoką ir A. Šliaupą) nustatyti atlikus: 1 – seisminius tyrinėjimus, 2 – aeromagnetinius tyrinėjimus, 3 – morfostruktūrinę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

Fig 1. The location scheme of the tectonic breaks and network of the finite elements at the Ignalina NPP. 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 NPP, 5 – node of the finite element, 6 – GPS points, 7 – number of the finite element

1 lentelė. Punktų koordinatės ir jų pokyčiai

Table 1. Coordinates of points and their changes

Punkto numeris	x_{98} (m)	y_{98} (m)	x_{99} (m)	y_{99} (m)	Δx (m)	Δy (m)
3	64276,247	57780,546	64276,255	57780,555	0,008	0,009
4	61073,407	62485,044	61073,417	62485,044	0,010	0,000
5	60745,917	55036,724	60745,930	55036,728	0,013	0,004
6	66983,435	47762,041	66983,429	47762,049	-0,006	0,008
8	75083,175	52536,489	75083,165	52536,487	-0,010	-0,002
9	72475,732	65068,225	72475,736	65068,226	0,004	0,001
10	71040,621	61144,137	71040,626	61144,137	0,005	0,000



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

poslinkiams modeliuoti. Nagrinėjamosios teritorijos skaidymas keturkampiais baigtiniais elementais, atsižvelgiant į pradinių taškų padėtis bei skaidymo sąlygas, atliktas naudojant programinį paketą *Ansys* [7].

Keturkampis aprašomas aštuoniais mazginiais taškais: I, J, K, L, M, N, O, P. Baigtinio elemento geometrija, mazginių taškų pasiskirstymas bei koordinacių sistema pavaizduota 2 paveiksle. Kiekvienas keturkampio mazginis taškas turi du laisvės laipsnius: poslinkius šiaurės ir rytų kryptimis.

Poslinkiai baigtiniame elemente aprašomi formulėmis [7, 8]:

$$\begin{aligned}
 u_i = & \frac{1}{4} (u_I (1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1) + \\
 & + u_J (1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1) + \\
 & + u_K (1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1) + \\
 & + u_L (1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1)) + \\
 & + \frac{1}{2} (u_M (1-s_i^2)(1-t_i) + u_N (1+s_i)(1-t_i^2) + \\
 & + u_O (1-s_i^2)(1+t_i) + u_P (1-s_i)(1-t_i^2)),
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 v_i = & \frac{1}{4} (v_I (1-s_i)(1-t_i)(-s_i-t_i-1) + \\
 & + v_J (1+s_i)(1-t_i)(s_i-t_i-1) + \\
 & + v_K (1+s_i)(1+t_i)(s_i+t_i-1) + \\
 & + v_L (1-s_i)(1+t_i)(-s_i+t_i-1)) + \\
 & + \frac{1}{2} (v_M (1-s_i^2)(1-t_i) + v_N (1+s_i)(1-t_i^2) + \\
 & + v_O (1-s_i^2)(1+t_i) + v_P (1-s_i)(1-t_i^2)),
 \end{aligned} \quad (16)$$

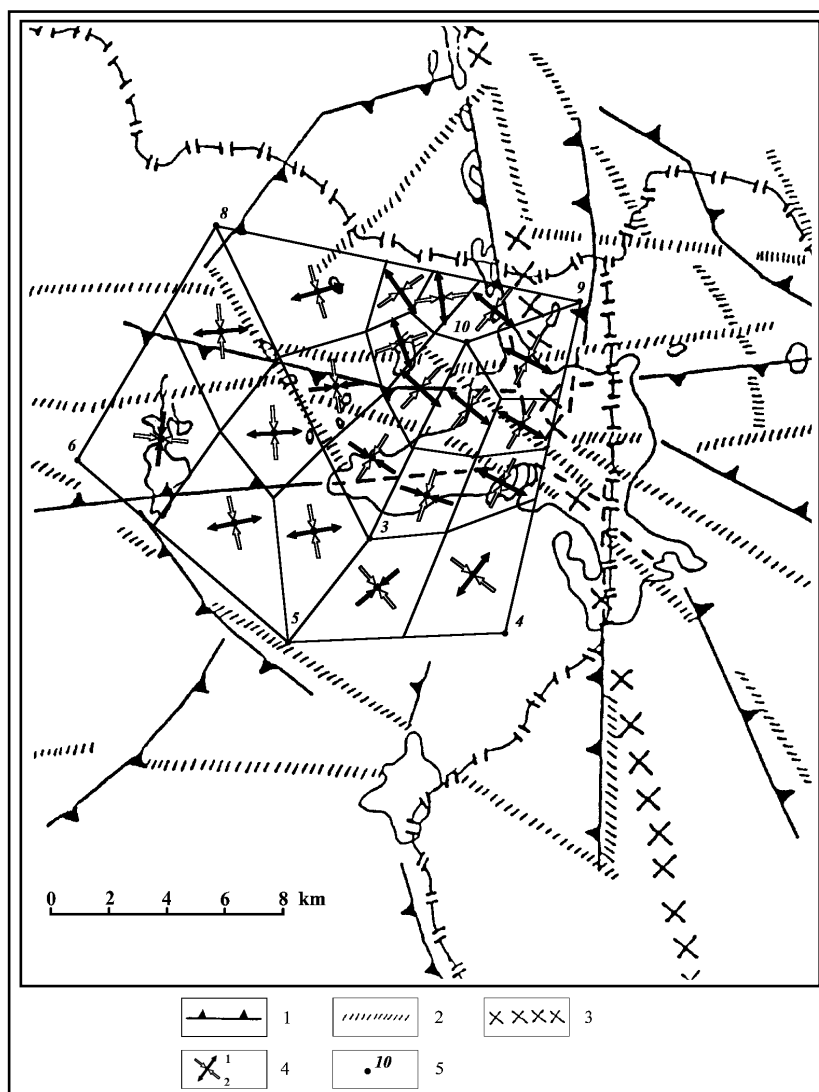
čia $u_I, u_J, u_K, u_L, u_M, u_N, u_O, u_P, v_I, v_J, v_K, v_L, v_M, v_N, v_O, v_P$ – koordinacių poslinkiai mazginiuose taškuose, s_i, t_i – skaičiuojamųjų taškų sąlyginių koordinacių reikšmės (2 pav.). Sąlyginės kiekvieno baigtinio elemento koordinacių sistemos pradžia sutampa su baigtinio elemento svorio centru, ašių kryptys – su priimtos bendrosios koordinacių sistemos ašių kryptimis, o reikšmės baigtiniame elemente kinta nuo -1 iki $+1$.

Baigtinių elementų mazginių taškų koordinacių poslinkiai nustatyti pagal geodezinio tinklo koordinacių poslinkius, taikant programinio paketo *Ansys* procedūras. Skaičiuojant mazginių taškų poslinkius, įvertinamas pagal pradinių taškų informaciją gautas mechaninis izotropinio kūno plokštuminis deformacijų modelis. Svarbiausių horizontaliųjų deformacijų baigtinio elemento mazginiuose taškuose reikšmės pateiktos 2 lentelėje. Baigtinio elemento svarbiausių deformacijų kryptys pavaizduotos 3 paveiksle. Svarbiausios deformacijos yra didžiausias ir mažiausias santykinis pailgėjimas. Jos yra tarpusavyje statmenos.

Naudojantis modeliavimo analizės rezultatais (3 pav.) pastebimi tam tikri Žemės plutos horizontaliųjų deformacijų pasiskirstymo Ignalinos atominės elektrinės rajone dėsningumai. Jie susiję su teritorijos tektonine sandara [15]. Didžiausių santykinų deformacijų kryptys beveik lygiagrečios, o mažiausių santykinų

2 lentelė. Svarbiausių deformacijų baigtinių elementų mazginiuose taškuose reikšmės
Table 2. Principal strain of nodes of the finite elements

Mazginio taško Nr.	$\lambda_1 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_2 \cdot 10^{-6}$	Mazginio taško Nr.	$\lambda_1 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_2 \cdot 10^{-6}$
1	0,49	-2,69	27	0,33	-0,63
2	0,01	-0,61	30	0,68	-0,71
3	0,60	-2,14	33	0,83	-0,29
4	0,50	-1,51	35	0,12	-0,21
5	0,37	-1,33	37	0,34	-0,76
6	0,04	-0,17	40	0,26	-0,51
7	0,78	-3,50	43	0,15	-0,85
9	0,39	-0,57	49	0,00	-0,58
11	-0,08	-0,61	50	0,24	-0,65
14	0,22	-0,59	51	0,02	-0,34
17	0,50	-0,51	52	0,06	-0,23
20	0,67	0,02	64	-0,01	-0,78
22	0,27	-0,31	65	0,19	-0,64
24	0,63	-0,12	66	0,39	-0,77



3 pav. Svarbiausių horizontalių Žemės plutos deformacijų 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 – svarbiausios deformacijos (1 – didžiausias santykinis pailgėjimas, 2 – mažiausias santykinis pailgėjimas), 5 – GPS punktas

Fig 3. Directions of the horizontal principal strains of the Earth crust. 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 – principal strains (1 – maximum relative lengthening, 2 – minimum relative lengthening), 5 – GPS points

deformacijų kryptys – statmenos kristalinio pamato lūžiams.

Mažiausios santykinės deformacijos neigiamos, t. y. geodinaminiam poligone Žemės plutos spaudimo vyraujanti kryptis yra statmena pagrindiniams tektoniniams lūžiams.

Kadangi didžiausiojo santykinio pailgėjimo krypčių orientacija yra artima pagrindinių tektoninių lūžių kryptims, galima daryti prielaidą, kad vyksta tam tikras blokų poslinkis pagal tektoninius lūžius. Geodeziniais matavimais nustatytų svarbiausių deformacijų kryptys Ignalinos atominės elektrinės rajone bendrais bruožais sutampa su [15] darbe pateiktomis geologiniais tyrimais nustatytais didžiausiomis Žemės plutos spaudimo kryptimis rytinėje Lietuvos dalyje.

Žemės plutos horizontalių deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone tyrimo rezultatai, nustatyti modeliuojant baigtinių elementų metodu, neprieštarauja [13, 14] darbuose gautiems rezultatams.

Horizontalių deformacijų modeliavimas baigtinių elementų metodu leidžia tiksliau nustatyti Žemės plutos deformacijų dėsningumus bei interpretuoti dabartinius geodinaminis procesus.

4. Išvados

1. Horizontalių Žemės plutos deformacijų modeliavimas pagal geodezinių matavimų duomenis, taikant baigtinių elementų metodą, detalizuoja tiriamosios teritorijos dabartinio tektoninio aktyvumo struktūrą ir palengvina geotektoninį matavimo rezultatų interpretavimą.

2. Atliktas Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės geodinaminio poligono teritorijoje modeliavimas baigtinių elementų metodu akivaizdžiai rodo šio metodo privalumus ir *Ansys* programinio paketo praktinio panaudojimo geodinaminiais tyrimams galimybes.

3. Taikant programinį paketą *Ansys* Žemės plutos deformacijoms modeliuoti baigtinių elementų metodu įvertinamas izotropinio kūno mechaninis deformacijų modelis. Taip sudarytas horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų modelis geriau atitinka tikrąjį Žemės plutoje vykstantį fizinį procesą negu modeliai, sudaryti remiantis tiesiniu geometrinu interpoliavimu.

4. Baigtinių elementų metodu sudarytas horizontaliųjų Žemės plutos judesių Ignalinos atominės elektrinės rajone modelis labai susijęs su Žemės plutos tektonine sandara. Svarbiausių deformacijų didžiausiojo santykinio pailgėjimo kryptingumas yra artimas pagrindinių Žemės plutos lūžių šioje teritorijoje kryptims, o mažiausių santykinio pailgėjimų kryptys statmenos tektoniniams lūžiams. Kadangi mažiausieji santykiniai pailgėjimai yra neigiamo ženklo, galima teigti, kad vyraujanti Žemės plutos geotektoninio spaudimo šiame rajone kryptis yra statmena Drūkšių ežerą kertančiai lūžių zonai, kuri tęsiasi iš vakarų į rytus ir rytinėje Drūkšių ežero dalyje daro posūkį į pietryčius.

Literatūra

- 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).
- Zakarevičius, A. Coordinate systems of Lithuanian geodetic networks and their connection (Lietuvos geodezinių tinklų koordinačių sistemos ir jų ryšiai). Vilnius: Technika, 1996. 200 p. (in Lithuanian).
- Zakarevičius, A. Estimation of the tensors and parameters of the space deformations of the Earth crust (Erdvinių Žemės plutos deformacijų tenzorių ir deformacijų įvertinimas). *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVI, No 1. Vilnius: Technika, 2000, p. 39–42 (in Lithuanian).
- Esikov, N. P. Tectonophysical aspects of the analysis of modern movements of the Earth's crust (Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности). Новосибирск: Наука, 1979. 182 p. (in Russian).
- 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.
- Shanlong Kuang. Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications. Ann Arbor Press, Inc. Chelsea, Michigan, 1996. 368 p.
- Ansys theory reference. 001099. Ninth Edition. SAS IP, Inc., 1998.
- Zienkiewicz, O. C. The finite element method. McGraw-Hill Company, London, 1977. 787 p.
- Wilson, E. L.; Taylor, R. L.; Doherty, W. P.; Ghaboussi, J. Incompatible displacement models. *Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics*, edited by S. J. Fenves, et al, Academic Press, Inc., N. Y. and London, 1973, p. 43–57.
- Taylor, R. L.; Beresford, P. J.; Wilson, E. L. A Non-conforming element for stress analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 10, 1976, p. 1211–1219.
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. Employment of the affined method of recalculation of co-ordinates to determine the horizontal deformations of the Earth crust (Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų nustatymas afinio koordinačių perskaičiavimo būdu). *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXIX, No 1. Vilnius: Technika, 2003, p. 13–19 (in Lithuanian).
- Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. Foundations of the theory of elasticity (Tamprumo teorijos pagrindai). Vilnius: Technika, 2000. 264 p. (in Lithuanian).
- Zakarevičius, A.; Stanionis, A. The features of dispersion of horizontal deformations of the Earth's crust in the region of Ignalina nuclear power plant (Horizontaliųjų Žemės plutos deformacijų Ignalinos atominės elektrinės rajone sklaidos ypatumai). *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXIX, No 4. Vilnius: Technika, 2003, p. 119–123 (in Lithuanian).
- 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). *Инженерна геодезія*, 49, Київ, 2003, p. 102–110 (in Russian).
- Tectonic structure of Lithuania (Lietuvos tektoninė sandara). Compiled and edited by P. Suveizdis, Institute of Geology and Geography. Vilnius, 2003. 160 p. (in Lithuanian).