

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Шило Євгеній Олександрович

УДК 550.311

**М о д е л ю в а н н я т р а н с ф о р м а ц і ї
ф і г у р и З е м л і і ї ї в п л и в у н а
г е о д и н а м і ч н і п р о ц е с и**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерної геодезії у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України
м. Львів

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Церклевич Анатолій Леонтійович,
завідувач кафедри інженерної геодезії
Національного університету «Львівська політехніка»,
м. Львів;

офіційні опоненти – доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, професор
Максимчук Валентин Юхимович,
директор Карпатського відділення Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Львів;

кандидат технічних наук, доцент
Тадєєв Олександр Антонович,
доцент кафедри геодезії та картографії Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне.

Захист дисертації відбудеться «19» квітня 2019р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 502 II навч. корп.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «13» березня 2019р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доцент Паляниця Б.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Геодезія, вирішуючи основну задачу – визначення фігури і зовнішнього гравітаційного поля Землі та їх змін у часі, інтегрується у всі науки про Землю. Особливо велику і чи не основну роль відіграють геодезичні методи та результати вимірювань у вирішенні актуальних проблем такої галузі знань в науках про Землю, як «Геодинаміка», що має теоретичне і практичне значення. При розгляді ключових проблем геодинаміки фігура нашої планети представляє істотний інтерес, так як її поверхня нерозривно пов'язана з будовою та геодинамічними процесами, з історією виникнення та еволюцією Землі. Варіації ротаційного режиму Землі як космічного тіла, а також ендегенні і екзогенні процеси призводять до трансформації фігури зовнішньої поверхні літосфери протягом геологічної історії. Моделювання трансформації фігури Землі і її впливу на геодинамічні процеси є актуальними, оскільки ці питання пов'язані з важливістю побудови глобальної моделі динаміки Землі. За переконанням одного із авторитетних вчених в області геодинаміки, геолога із світовим ім'ям В.Є. Хаїна *«Глобальна модель динаміки Землі повинна мати два аспекти: актуалістичний та історичний. Актуалістичний аспект передбачає врахування всіх сучасних параметрів, що стосуються фігури Землі... Історичний аспект повинен включати дві складові: ретроспективну, тобто аналіз історії Землі з часу її утворення, а також можливу передісторію; і прогностичну, тобто перспективу подальшого розвитку нашої планети»*.

На сучасному етапі розвитку науково-технічного прогресу та технологій для оцінки змін фігури в часі використовують такі засоби, як супутникові лазерні вимірювання, радіоінтерферометрію з наддовгою базою, дані GNSS та інші методи. Однак геодинамічна активність Землі нерівномірна в просторі і часі. Ймовірна періодичність глобальних процесів геодинамічної еволюції нашої планети. Часовий масштаб геологічних явищ (мільйони і мільярди років) знаходиться далеко за межами реалізованих геодезичними, астрометричними та космічними методами тривалості експериментів. Ми бачимо лише те, що Земля нам показує на нескінченно малому проміжку своєї геологічної еволюції, і практично позбавлені можливості відтворити ті процеси, які хочемо вивчити. З іншого боку, факти про внутрішню будову і еволюцію планети, отримані різними методами наук про Землю, укладаються у виключно складну картину динамічних явищ і тому природа динамічних сил дотепер залишається багато в чому гіпотетичною. Проте накопичені факти можна спробувати пояснити на основі доказових припущень у відповідності із фундаментальними законами фізики і механіки та математичного моделювання.

Згідно із плейт-тектонікою головним фактором формування рельєфу земної поверхні є взаємодія рухомих в горизонтальному напрямку літосферних плит. Відповідно до цієї концепції повинна відбуватись зміна параметрів і орієнтація фігури поверхні літосфери.

В дисертаційній роботі з використанням теорії і методів динамічної (чотиривимірної) фізичної геодезії виконується комп'ютерне моделювання та ідентифікація геодинамічної системи «Фізичної поверхні Землі» за результатами просторово часових рядів GNSS спостережень і геопалеорекострукцій. Саме

комп'ютерні і ГІС технології надали можливість здійснити дослідження щодо динамічної еволюції фігури Землі, оскільки часові геологічні масштаби, на яких протікає еволюція планети, є недоступними для фізичних експериментів.

У методологічному відношенні дисертаційна робота є подальшим розвитком наукових уявлень, які розвивалися на пострадянському просторі Б.П. Лічковим, М.В. Стівасом, В.О. Цареградським, Г.Н. Каттерфельдом, П.С. Вороновим, Ж.С. Єржановим, в Україні К.Ф. Тяпкіним, М. М. Довбнічем, А.Л. Церклевичем, І.В. Карпенком, О.Б. Гінтовим, О.С. Зайцем, О.М. Марченком, за кордоном А. Шейдегером, Ю.В. Баркіним, О.В. Доліцким, Ю.М. Авсюком, Ю.Л. Ребецьким, Л.М. Расцветаєвим, А.В. Вікуліним, Вень Бинь Шеньом, Жун Суньом, Х. Ву та ін. і є наступним кроком у вивченні ролі ротаційних факторів у протіканні різномасштабних геотектонічних і геодинамічних процесів, що враховує сучасні досягнення в науках про Землю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідна робота автора виконана на кафедрі інженерної геодезії Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка» і відповідає тематиці кафедри «Модернізація технологій інженерно-геодезичних робіт та геодезичний моніторинг інженерних споруд і геодинамічних явищ» та одному з наукових напрямів Інституту геодезії «Дослідження фігури та зовнішнього гравітаційного поля Землі і планет, створення геоінформаційних систем, програмних продуктів і баз геопросторових даних».

Дослідження планетарної еволюції Землі (рухи земної кори та переміщення полюсів, варіації гравітаційного поля, швидкість обертання тощо) визначено як одне з пріоритетних завдань в концепції науково-технічної програми розвитку топографо-геодезичної діяльності та національного картографування на 2014-2018 роки.

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є формування моделей фігури літосфери Землі на основі результатів визначення висот планетарного рельєфу в сучасну епоху і за даними геопалеорекострукцій розміщення материків і океанічної поверхні в масштабі геологічного часу. Враховуючи параметри еволюційних змін фігури поверхні літосфери, встановити діючі масові сили, які зумовлюють динаміку напруженого стану у верхній оболонці Землі.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені такі завдання:

1. Провести комплексний огляд та аналіз інформації, що відображує сучасний стан проблеми вивчення фігури і ротаційного режиму Землі та планетарних геодинамічних процесів.
2. Розробити алгоритми, програми і виконати визначення параметрів двовісного та тривісного еліпсоїдів, що апроксимують висоти поверхні літосфери, з оцінкою їх точності.
3. Виконати дослідження зміни параметрів двовісного та тривісного еліпсоїдів, що апроксимують висоти поверхні літосфери, на сучасну епоху за даними координат постійно діючих перманентних станцій GNSS.
4. Розробити алгоритм і програмно реалізувати побудову цифрових моделей рельєфу поверхні (ЦМРП) літосфери за даними геопалеорекострукцій.

5. Визначити параметри двовісного та тривісного еліпсоїдів, що апроксимують висоти поверхні літосфери на основі геопалеорекоконструкцій розміщення материків і океанічної поверхні в різні геологічні епохи та дослідити закономірності їх зміни.

6. Розробити алгоритм і програмно реалізувати визначення тангенціальних масових сил, які зумовлюють динаміку напруженого стану у верхній оболонці Землі, враховуючи параметри еволюційних змін фігури та її переорієнтацію в масштабі геологічного часу.

7. Проаналізувати отримані результати і надати їм обґрунтовану інтерпретацію з позицій геодинамічних процесів еволюційного розвитку Землі.

Об'єктом дослідження є фігура поверхні літосфери Землі, що змінюється в процесі еволюційного саморозвитку.

Предметом дослідження є моделі фігури поверхні літосфери Землі в масштабі геологічного часу і тангенціальні масові сили, що виникають в результаті зміни орієнтації фігури, та їх роль у протіканні геодинамічних процесів.

Методи дослідження. Під час розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач використовувалися: методи математичного моделювання та апроксимації висот рельєфу поверхні літосфери для кількісної оцінки параметрів еліпсоїдів. Для комплексної обробки та аналізу вхідної інформації (координат постійно діючих перманентних станцій GNSS, планетарної топографії і даних геопалеорекоконструкцій) широке застосування у роботі знайшли геоінформаційні технології.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати виконаних досліджень, комп'ютерне моделювання геопалеорекоконструкцій планетарного переміщення мас та оцінка їх впливу на ротаційні параметри і фігуру літосфери Землі надали імовірну інформацію для нового сприйняття геодинамічних процесів і закономірностей структуроутворення, що має важливе значення для геодинаміки та тектоніки. В дисертаційній роботі:

1. Вперше для визначення динаміки зміни фігури літосфери Землі використана ідея апроксимації координат постійно діючих перманентних станцій ГНСС в північній і південній півкулях двовісним та тривісним еліпсоїдами, на основі чого виявлені трендові закономірності (з тенденцією до збільшення середнього радіусу) зміни фігури планети в сучасну епоху.

2. Вперше в якісному відображенні здійснено побудову ЦМРП літосфери за даними геопалеорекоконструкцій для визначення вікових змін фігури літосфери Землі впродовж 600 млн. років.

3. Вперше одержано результати, що визначають трендові закономірності параметрів і орієнтацію еліпсоїдів, що описують поверхню літосфери в масштабі геологічного часу.

4. Вперше запропоновано та апробовано метод визначення тангенціальних масових сил на основі введення поняття «геоеволюційного» відхилення виска, пов'язаного з переорієнтацією фігури літосфери. Показано, що тангенціальні масові сили створюють єдине планетарне геодинамічне поле вихрових структур через взаємодію між собою блоків і плит в рамках вихрової

ротаційно-гравітаційної моделі еволюційної динаміки геосередовища. Це, в свою чергу, надає нові можливості для побудови динамічних моделей, в основу яких покладена нова геологічна парадигма – вихрова геодинаміка.

5. Запропонована та обґрунтована гіпотеза щодо дії динамічних сил, які спонукають до трансформації фігури літосфери в процесі еволюційного розвитку Землі: вертикальні (радіальні) сили порушують осьову симетрію, а горизонтальні сили (за рахунок енергії обертання), відновлюють цю симетрію шляхом переміщення окремих плит і блоків, а також «квазірідкої» внутрішньої речовини в напрямку дії тангенціальних масових сил.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи визначається розробкою теоретичних підходів і побудованих на їх основі моделей, алгоритмів та програм, що описують динаміку зміни фігури літосфери в масштабі геологічного часу. Отримані результати можуть бути використані в теоретичних і практичних роботах в галузі астрономії, геодезії та геофізики для вивчення планетарних геодинамічних процесів та напруженого стану. Вони можуть бути впроваджені в навчальний процес у лекційні і лабораторні курси фахових дисциплін «Планетарна та інженерна геодинаміка» та «Геодезичний моніторинг геодинамічних явищ та деформацій споруд» у Національному університеті «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні і прикладні положення роботи є підсумком науково-дослідної роботи автора. В ході виконання обчислень використовувалося програмне забезпечення, розроблене автором особисто. У працях, написаних у співавторстві, внесок дисертанта полягає в наступному: [1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13] – дисертанту належить збір вхідної інформації, розробка програм, надання інтерпретації; [4, 6, 8] – апробація методики розрахунку масових сил, що створюють напружений стан тектоносфери.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися на Міжнародних та Всеукраїнських наукових з'їздах, конференціях, симпозіумах, зокрема:

1. XX Міжнародна науково-практична конференція «ГЕОФОРУМ-2015» м. Брюховичі, Львівська область, 23-25 квітня 2015 р.;
2. XXI Міжнародна науково-технічна конференція «ГЕОФОРУМ-2016», Львів-Брюховичі-Яворів, 13-15 квітня 2016 р.;
3. VI Міжнародна наукова конференція «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища», Львів, 20-23 вересня 2016 р.;
4. III Міжнародна наукова конференція «Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі», Львів-Верхнє Синьовидне, 13-15 жовтня 2016 р.;
5. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні», Ужгород-Синевир, 6-8 жовтня 2016 р.;
6. XXII Міжнародна науково-технічна конференція «ГЕОФОРУМ-2017», Львів-Брюховичі-Яворів, 25-27 квітня 2017 р.;

7. 7th International Youth Science Forum «LITTERIS ET ARTIBUS 2017», Lviv, Ukraine November 23–25, 2017;

8. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GEOTERRACE-2017», Львів, 14-17 грудня 2017 р.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 13 наукових праць. Чотири статті у наукових фахових виданнях України [3, 4, 5, 6], три з яких входять до наукометричної бази Web of Science та Index Copernicus. Дві статті в наукових періодичних виданнях інших держав [1, 2], які входять до наукометричної бази даних Scopus. Дві статті, які додатково висвітлюють роботу [7, 8] у науковому періодичному виданні. П'ять публікацій у збірниках тез і матеріалах наукових конференцій [9, 10, 11, 12, 13].

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновку, списку використаних джерел (98 найменувань) та семи додатків. Загальний обсяг дисертації становить 156 сторінки, в тому числі 38 рисунків, 7 таблиць та 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, відзначено наукову новизну отриманих результатів та особистий внесок автора, структуру й обсяг роботи, відомості про публікації.

Перший розділ «*Огляд та аналіз інформації з вивчення фігури Землі і планетарних геодинамічних процесів*» присвячений опису основних концепцій та історичній ретроспективі вивчення фігури Землі та аналізу геодезичних методів у дослідженні планетарних геодинамічних процесів. Відзначено зв'язок фігури Землі з її внутрішньою будовою. Стисло наведені сучасні досягнення у вивченні гравітаційного поля, фізичної поверхні та основні поняття про рівноважний стан Землі – концепцію ізостації і тектоніку літосферних плит.

Насамперед зауважимо, що на сучасному етапі вивчення фігури Землі, варто розрізняти чотири її типи:

- фігуру планети в гідростатичному стані (в основному, теоретичні дослідження, починаючи з Ньютона), яка використовується для оцінки ізостатичного та напруженого стану Землі;
- фігуру фізичної поверхні (або геометричну фігуру), яка, стосовно Землі, описує поверхню материків і дно океану (геологи і геофізики в геодинамічних дослідженнях використовують термін «фігура поверхні літосфери»);
- динамічну фігуру, яка пов'язана з моментами інерції небесного тіла, для Землі – це тривісний еліпсоїд інерції;
- гравітаційну фігуру, яка охоплює всі маси, включаючи і водну поверхню, і характеризується основною рівневою поверхнею (геоїдом).

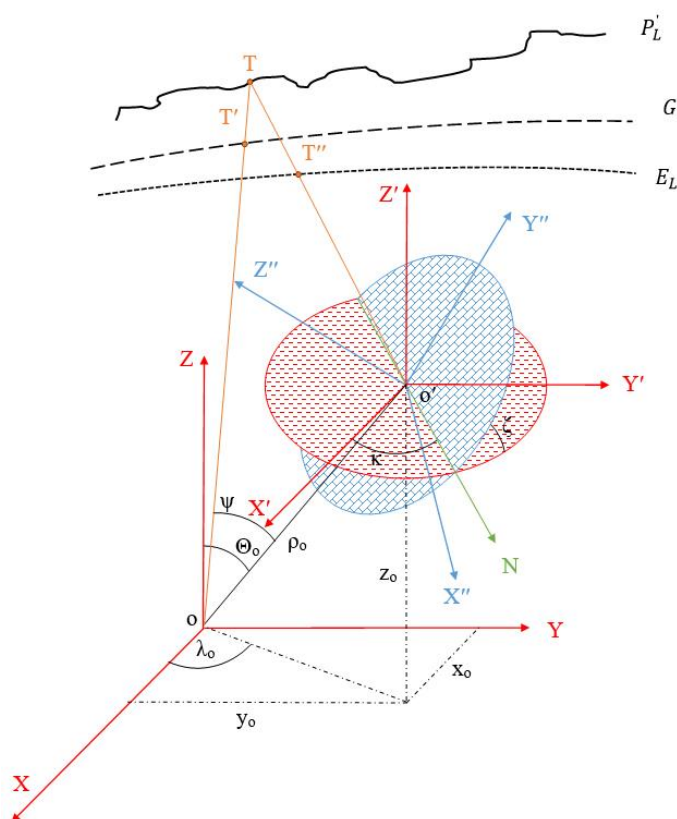
На сьогодні розвиток космічних технологій та методів вивчення фігури Землі та гравітаційного поля надали широкі можливості для геодинамічних досліджень зв'язку фігури Землі з її генезисом, еволюцією, будовою і процесами всередині планети.

В дисертаційній роботі основна увага приділяється дослідженню вікових змін фігури поверхні літосфери в сучасну епоху та в минулі геологічні періоди. Така постановка задачі перекликається з дослідженнями інших вчених і привносить певний доробок в побудову динамічної теорії еволюції Землі, розробка якої знаходиться на етапі накопичення результативних даних, теоретичних досліджень, відпрацювання нових методів та експериментів у вивченні вікових, періодичних та нерегулярних змін фігури, гравітаційного і магнітного полів, внутрішньої будови, параметрів обертання і руху полюсів.

У другому розділі «Дослідження фігури літосфери Землі і впливу космічних та ендегенних факторів на параметри обертання і орієнтацію полюса» здійснено аналіз сучасного стану вивчення ротаційного режиму, геодинамічних ефектів від обертання Землі та можливих причин переміщення географічного і магнітного полюса. Представлено алгоритми та результати побудови моделей фігури літосфери у вигляді двовісного і тривісного еліпсоїдів. Подані результати дослідження зміни параметрів фігури літосфери Землі в сучасну епоху та надана їх геодинамічна інтерпретація.

Для дослідження планетарних характеристик фігури літосфери Землі і їх вікових змін реалізована ідея апроксимації фізичної поверхні двовісним і тривісним еліпсоїдами.

Апроксимація висот глобальної ЦМР поверхні літосфери Землі двовісним еліпсоїдом. Розглянемо рис. 1, де зображені: P'_L – фізична поверхня Землі; G –



геоїд; E_L – еліпсоїд, параметри якого необхідно визначити; o – центр мас Землі; o' – центр шуканого еліпсоїда; oZ – напрям осі обертання Землі; $o'Z'$ – лінія паралельна осі oZ ; $o'Z''$ – напрямок малої осі еліпсоїда E_L ; κ , ζ – два з трьох кутів Ейлера; N – напрям лінії вузлів; θ_0 , λ_0 , ρ_0 – кути та відстань, що визначають зміщення центру шуканого еліпсоїда від центру мас; x_0 , y_0 , z_0 – лінійні величини, що визначають зміщення шуканого еліпсоїда; T – точка на фізичній поверхні Землі; $oT' = \rho'$; $o'o = \rho_0$; $oT = \rho$; $TT'' = h$; $o'T'' = r$; H – висота точки T над рівнем моря.

Рис. 1. Ілюстрація апроксимації поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом

Використовуючи апроксимаційний метод, представимо основні рівняння, що визначають сім параметрів еліпсоїда з оцінкою точності.

$$h = A \cos \theta + B \sin \theta \cos \lambda + C \sin \theta \sin \lambda + D \cos^2 \theta + K \sin 2\theta \sin \lambda - \Delta a + H$$

$$\left. \begin{aligned} A &= -\rho_0 \cos \theta_0 \\ B &= -\rho_0 \sin \theta_0 \cos \lambda_0 \\ C &= -\rho_0 \sin \theta_0 \sin \lambda_0 \\ D &= -\alpha_0 + \alpha(1 + \Delta\alpha) \\ K &= \alpha(1 + \Delta\alpha)\zeta \sin \kappa \\ M &= -\alpha(1 + \Delta\alpha)\zeta \cos \kappa \\ \Delta a &= a - a_0 \end{aligned} \right\}, \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial A}{\partial \rho_0} & \frac{\partial A}{\partial \theta_0} & \frac{\partial A}{\partial \lambda_0} & \dots & \frac{\partial A}{\partial a} \\ \frac{\partial B}{\partial \rho_0} & \frac{\partial B}{\partial \theta_0} & \frac{\partial B}{\partial \lambda_0} & \dots & \frac{\partial B}{\partial a} \\ \frac{\partial C}{\partial \rho_0} & \frac{\partial C}{\partial \theta_0} & \frac{\partial C}{\partial \lambda_0} & \dots & \frac{\partial C}{\partial a} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta a}{\partial \rho_0} & \frac{\partial \Delta a}{\partial \theta_0} & \frac{\partial \Delta a}{\partial \lambda_0} & \dots & \frac{\partial \Delta a}{\partial a} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Q}_x \mathbf{T}^T$$

$$m_{\rho_0} = \mu \cdot \sqrt{\mathbf{C}_{T_{11}}}$$

$$m_{\theta} = \mu \cdot \sqrt{\mathbf{C}_{T_{22}}}$$

...

$$m_a = \mu \cdot \sqrt{\mathbf{C}_{T_{77}}}$$

Апроксимація висот глобальної ЦМР поверхні літосфери Землі тривісним еліпсоїдом. Для розуміння апроксимації

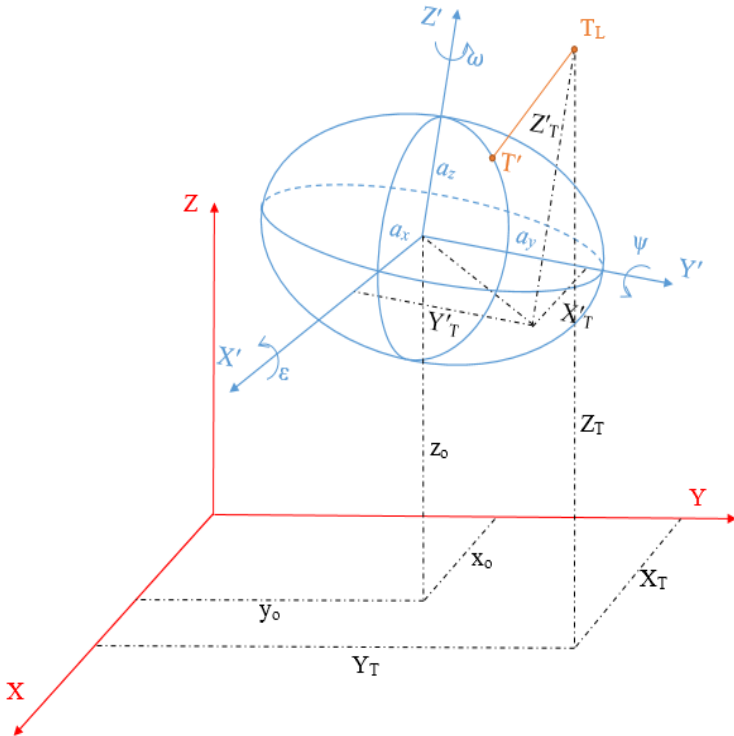


Рис. 2. Ілюстрація апроксимації поверхні літосфери тривісним еліпсоїдом

поверхні літосфери тривісним еліпсоїдом звернемося до рис. 2. T_L – точка на фізичній поверхні Землі; T' – точка на поверхні еліпсоїда, параметри якого необхідно визначити; X_T, Y_T, Z_T – координати точки T у вихідній системі координат; X'_T, Y'_T, Z'_T – координати в системі відліку шуканого еліпсоїда; x_0, y_0, z_0 – координати центру шуканого еліпсоїда відносно вихідної системи координат; a_x, a_y, a_z – півосі; ϵ, ψ, ω – три кути повороту.

Для апроксимації тривісним еліпсоїдом висот поверхні літосфери через задані прямокутні координати точок, був використаний класичний спосіб найменших квадратів.

Будь-яку поверхню другого порядку можна описати відомим рівнянням в канонічному або в матричному вигляді:

$$AX_T^2 + BY_T^2 + CZ_T^2 + 2DX_T Y_T + 2EX_T Z_T + 2FY_T Z_T + 2GX_T + 2HY_T + 2IZ_T - 1 = 0$$

$$\begin{pmatrix} A & D & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G \\ H \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Оцінка точності визначуваних параметрів виконується за формулами:

$$\mathbf{K}_{x_0, y_0, z_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial A}{\partial x_0} & \frac{\partial B}{\partial x_0} & \frac{\partial C}{\partial x_0} & \dots & \frac{\partial I}{\partial x_0} \\ \frac{\partial A}{\partial y_0} & \frac{\partial B}{\partial y_0} & \frac{\partial C}{\partial y_0} & \dots & \frac{\partial I}{\partial y_0} \\ \frac{\partial A}{\partial z_0} & \frac{\partial B}{\partial z_0} & \frac{\partial C}{\partial z_0} & \dots & \frac{\partial I}{\partial z_0} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 C_{x_0, y_0, z_0} &= \mathbf{K}_{x_0, y_0, z_0} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{K}_{x_0, y_0, z_0}^T \\
 C_{\varepsilon, \psi, \omega} &= \mathbf{K}_{\varepsilon, \psi, \omega} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{K}_{\varepsilon, \psi, \omega}^T \\
 C_{a_x, a_y, a_z} &= \mathbf{K}_{a_x, a_y, a_z} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{K}_{a_x, a_y, a_z}^T
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 m_{x_0} &= \mu \cdot \sqrt{C_{x_0, y_0, z_0 11}} \\
 m_{y_0} &= \mu \cdot \sqrt{C_{x_0, y_0, z_0 22}} \\
 m_{x_0} &= \mu \cdot \sqrt{C_{x_0, y_0, z_0 33}} \\
 m_{\varepsilon} &= \mu \cdot \sqrt{C_{\varepsilon, \psi, \omega 11}} \\
 m_{\psi} &= \mu \cdot \sqrt{C_{\varepsilon, \psi, \omega 22}} \\
 m_{\omega} &= \mu \cdot \sqrt{C_{\varepsilon, \psi, \omega 33}} \\
 m_{a_x} &= \mu \cdot \sqrt{C_{a_x, a_y, a_z 11}} \\
 m_{a_y} &= \mu \cdot \sqrt{C_{a_x, a_y, a_z 22}} \\
 m_{a_z} &= \mu \cdot \sqrt{C_{a_x, a_y, a_z 33}}
 \end{aligned} \right\}$$

Апроксимація поверхні літосфери двовісним (тривісним) еліпсоїдом способом ітерацій. Для перевірки наведених вище алгоритмів апроксимації еліпсоїдами поверхні літосфери нами був запропонований ітеративний метод. Ідея методу полягала в тому, що канонічні рівняння еліпсоїдів в прямокутних координатах приводились до лінійного вигляду через розклад в ряд Тейлора, а далі через ітераційні наближення обчислювались поправки до початкових наближених значень шуканих параметрів еліпсоїдів.

Під час тестування алгоритмів і програм результати визначення параметрів двовісного і тривісного еліпсоїдів класичними методами апроксимації висот квазігеода та фізичної поверхні Землі з високою точністю співпали з результатами отриманими з використанням методу ітерацій. Це свідчить про те, що описані алгоритми апроксимації поверхні літосфери двовісним і тривісним еліпсоїдами є безпомилковими та достовірними.

В табл. 1 і 2 наведені значення параметрів двовісного і тривісного еліпсоїдів та їх похибки, отримані за результатами апроксимації висот поверхні літосфери Землі з використанням параметричного способу найменших квадратів. Визначення параметрів еліпсоїдів виконувалося на основі даних цифрової моделі рельєфу поверхні Землі ETOPO1 [NGIA, 2016]. Це цифрова модель рельєфу покриває всю поверхню планети з розрізнявальною здатністю одна мінута. Для вказаної моделі висоти попередньо були осереднені в межах трапецій $5^\circ \times 5^\circ$. В результаті були отримані 2592 значень висот поверхні літосфери h , які слугували вхідними даними.

Таблиця 1.

Параметри двовісного еліпсоїда

ЦМР	Вся сфера	Північна півкуля	Південна півкуля
$x_0, м$	-741,88 ±86,04	-1170,64 ±1056,31	-38,99 ±13,19
$y_0, м$	-491,57 ±57,01	-388,46 ±350,52	1,70 ±0,57
$z_0, м$	1421,79 ±164,89	1868,02 ±1685,58	7287,17 ±2462,39
$a, м$	6375117,00 ±169,04	6375114,91 ±437,96	6376300,87 ±533,92
$b, м$	6355640,08 ±247,83	6355772,53 ±2294,90	6362552,67 ±2798,15
$1/a$	327,31 ±6,32	329,59 ±33,20	463,79 ±80,16
K	133°,77 ±0°,02	159°,30 ±0°,01	110°,03 ±0°,01
Z	2°,6128 ±0°,03	2°,6100 ±0°,01	-2°,7746 ±0°,01

Параметри тривісного еліпсоїда

ЦМР	Вся сфера	Північна півкуля	Південна півкуля
$x_0, м$	1048,11 ±68,12	1919,35 ±156,05	885,22 ±176,69
$y_0, м$	695,10 ±68,14	640,98 ±156,17	-40,42 ±176,69
$z_0, м$	1109,69 ±67,86	935,39 ±683,71	7333,25 ±774,86
$a_x, м$	6374317,51 ±6,80	6373521,23 ±60,81	6375286,65 ±69,17
$a_y, м$	6375959,84 ±6,82	6376764,42 ±61,10	6377391,17 ±69,45
$a_z, м$	6355605,19 ±6,52	6355769,28 ±58,38	6362642,66 ±67,27
ε	1°,74 ±5°,54	2°,29 ±12°,70	-0°,76 ±14°,38
ψ	-1°,97 ±4°,94	1°,09 ±11°,33	-2°,59 ±12°,79
ω	-84°,83 ±5°,53	-77°,50 ±6°,88	49°,09 ±7°,79

Звернемо увагу на те, що полюси найменших осей отриманих еліпсоїдів не співпадають з полюсом Землі, тобто екваторіальна площина фігури фізичної поверхні нахилена до екваторіальної площини геоїда і відповідний кут нахилу не перевищує $\sim 3^\circ$ або ~ 300 км на дузі меридіана. Структурна асиметрія північної і південної півкуль також явно відстежується (колонки 3 і 4 табл.1 і 2), а це означає, що існує видовження широтних кіл південної півкулі і укорочення довжин широтних кіл північної півкулі, тобто наявність розширення південної півкулі і, відповідно, стиснення північної півкулі відносно центру фігури Землі. Зміщення центру мас відносно центру фігури також характерне для Землі. Все це вказує на грушоподібну фігуру планети, яка під впливом повільних вимушених відносних зміщень ядра і мантії може перебувати в динамічно-змінному стані.

Наступною задачею досліджень було виявлення вікових варіацій параметрів фігури літосфери Землі в сучасну епоху через деформації її поверхні. Для обчислень параметрів еліпсоїдів використовувались координати 2593 перманентних станцій з бази даних SOPAC на першу добу кожного року, починаючи з 2001 р. і закінчуючи 2016 р. Координати перелічених перманентних станцій приведено до однієї системи координат ITRF2008, а геодезичну широту, довготу і висоту віднесено до системи WGS84. Зазначимо також, що координати всіх станцій мають відповідні СКП їх визначення. Після опрацювання цих даних були отримані результати, які зображені на рисунках.

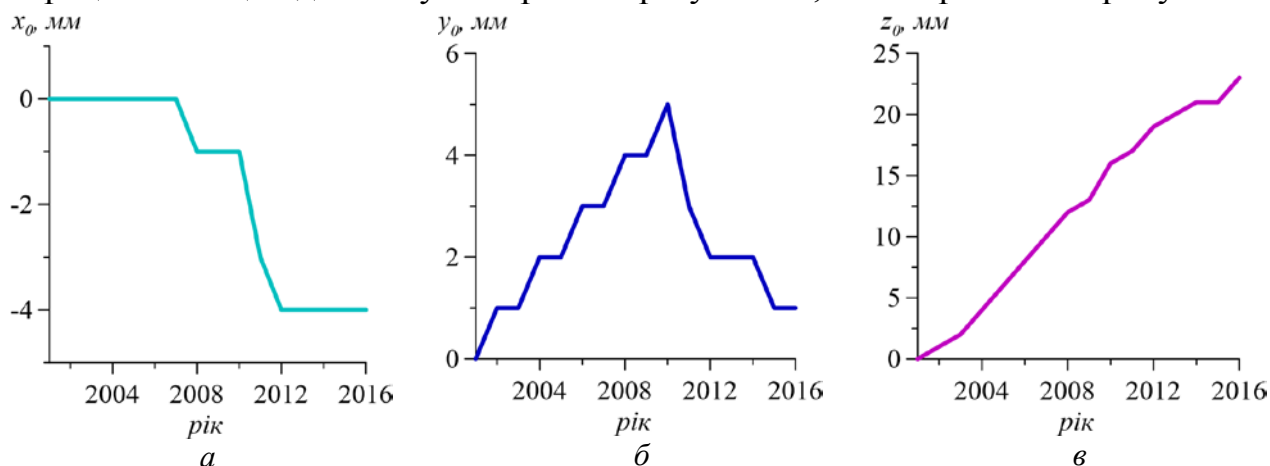


Рис. 3. Зміщення центру мас Землі, отримані апроксимацією двовісним еліпсоїдом координат перманентних станцій

Зокрема, на рис. 3 *a, б, в* і 4 *a, б* показані зміщення центра мас та величини зміни півосей двовісного еліпсоїда на вказаному часовому інтервалі, а на рис. 4 *в* – СКП визначення варіацій цих параметрів. Якщо порівняти графіки відповідних параметрів двовісного і тривісного еліпсоїдів, то вони є подібними.

У першу чергу відзначимо, що на рис. 4 *a, б* чітко відстежується майже лінійне збільшення малої півосі і зменшення великої півосі еліпсоїда з часом. Лінійна залежність від часу спостерігається і у зміні положення центру мас в напрямку осі *Z*, тобто до північного полюса Землі. Виявлена закономірність не може вважатись випадковою на рівні статистичної невизначеності, хоча величини варіацій цих параметрів за один рік характеризуються малими значеннями, близькими до СКП, але лінійний тренд явно відстежується.

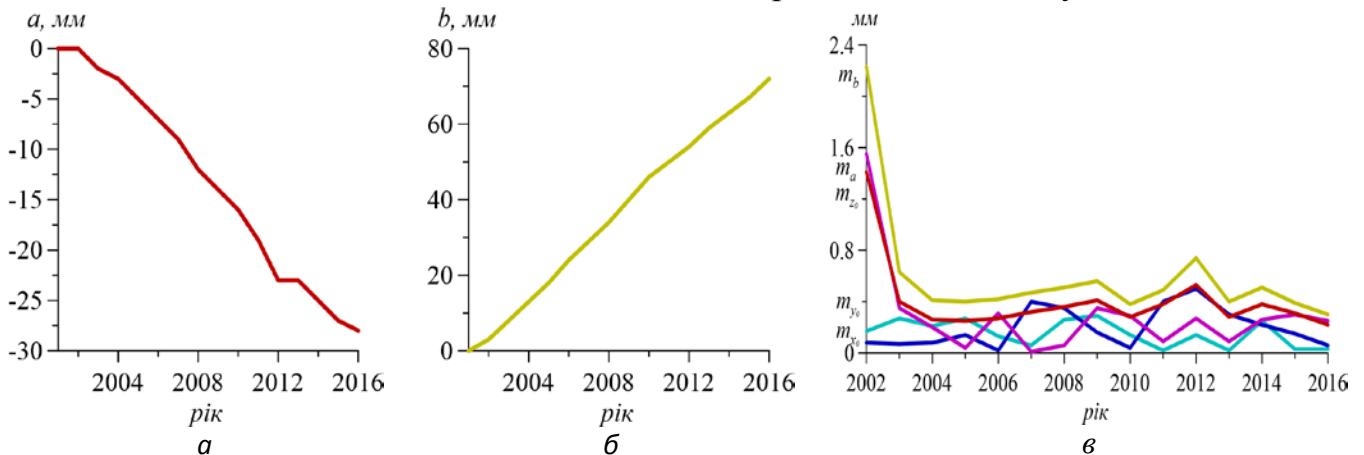


Рис. 4. Зміна півосей та СКП визначення зміни параметрів двовісного еліпсоїда

В табл. 3 наведені швидкості вікового збільшення середнього радіуса для всієї Землі та південної і північної півкуль. Отримані нами результати співставні з оцінками швидкості вікового збільшення середнього радіуса Землі інших авторів, які в своїх роботах використовували інший масив даних та методи опрацювання. Отже, можна стверджувати, що Земля розширюється зі швидкістю від 0,2 мм на рік. За нашими розрахунками середній радіус Землі за період 2001-2016 р.р. збільшився майже на 5 мм. Виявлену асиметрію в закономірності у змінах півосей еліпсоїда можна було б пояснити переміщенням земного ядра і континентальних мас кори в напрямку до півночі, про що аргументовано свідчать результати швидкості зміни радіуса для північної і південної півкулі.

Таблиця 3.

Швидкість вікового збільшення середнього радіуса Землі

Область	Швидкість зміни середнього радіуса, мм/рік	За результатами вимірів
Вся планета	+0,3	GNSS
Північна півкуля	+6,4	GNSS
Південна півкуля	+0,2	GNSS
Вся планета Shen and Zhang [2008]	+0,5	GPS
Вся планета Shen et al. [2008]	+0,3–0,6	Global GPS sites and temporal gravity observations
Вся планета Gerasimenko [2003]	+0,2	VLBI

Третій розділ «Модельовання переорієнтації фігури літосфери Землі в масштабі геологічного часу». Мета розділу на якісному і наближено кількісному рівні з використанням комп'ютерного моделювання ЦМРП літосфери за геопалеорекострукціями показати, як в процесі еволюційного саморозвитку планети в результаті дії гравітаційно-ротаційних та ендегенних сил відбувається перерозподіл мас, що приводить до трансформації фігури літосфери від двовісного еліпсоїда до тривісного і навпаки, зміни сплюсненості та переміщення полюса в геологічному часі. На основі обчислених параметрів еволюційних змін фігури поверхні літосфери, викликаних переорієнтацією планети, визначити діючі масові тангенціальні сили, які зумовлюють динаміку напруженого стану у верхній оболонці Землі.

Передусім відзначимо два ключові питання: як відобразити планове розміщення континентів і водної поверхні та як відобразити їхню висотну складову (гори, западини тощо). Наше розуміння тектонічного, палеогеографічного та палеокліматичного розвитку Землі є постійним проектом. Карти геопалеорекострукцій, в кращому випадку є звітом про прогрес, який описує наш сучасний стан знань та упереджень. З іншого боку цілком зрозумілим є те, що чим давніший вік палеонтологічних фактів та даних історичної геології, тим менш надійний результат їх інтерпретації в порівнянні із сучасними даними, які підтверджуються точними геодезичними, геофізичними і геологічними дослідженнями.

Для моделювання трансформації фігури Землі у далекі геологічні епохи, нами використані цифрові растрові карти геопалеорекострукцій розміщення материків і водної поверхні, які були створені професором R. Blakey в університеті північної Аризони і професором C. Scotese в Техаському університеті. Розміщення материків і океанічної поверхні на таких картах для деяких геологічних епох відповідно показані на рис. 5 а, б, в та г, д, е. Оскільки всі растрові зображення створені послідовно в певних кольорах, то з певним припущенням, знайшовши зв'язок між висотами моделі ETOPO1 і растровими картами геопалеорекострукцій, можна буде перейти до цифрової моделі рельєфу поверхні (ЦМРП) для геологічних епох, які прив'язані до відповідних карт із зображенням материків і водної поверхні. Якщо кожен піксель цього зображення розкласти на три кольорових складових (червоний, зелений і синій RGB) з певним рівнем яскравості, то на основі апроксимації заданої функції, що описується трьома змінними, можна отримати значення коефіцієнтів моделі. Для кожного пікселя отримуємо відповідне значення висоти та три кольорових складових, відображених у характеристиках яскравості, які вигідно представляти у вигляді поліноміального рівняння:

$$F(h) = \left. \sum_{m=0}^n a_m R^i G^j B^k \right\} \\ i + j + k \leq m$$

де, h – значення висоти відповідного пікселя; R, G, B – три складових кольору відповідного пікселя; a – невідомі коефіцієнти.

Для описаного випадку найкраще підходить поліном третього ступеня. Невідомі коефіцієнти в рівнянні обчислювались з використанням методу найменших квадратів.

Згідно із апроксимацією двовісним і тривісним еліпсоїдами висот фізичної поверхні Землі, були отримані результати, які характеризують їх параметри в сучасний період і для різних минулих геологічних епох протягом 600 млн. років.

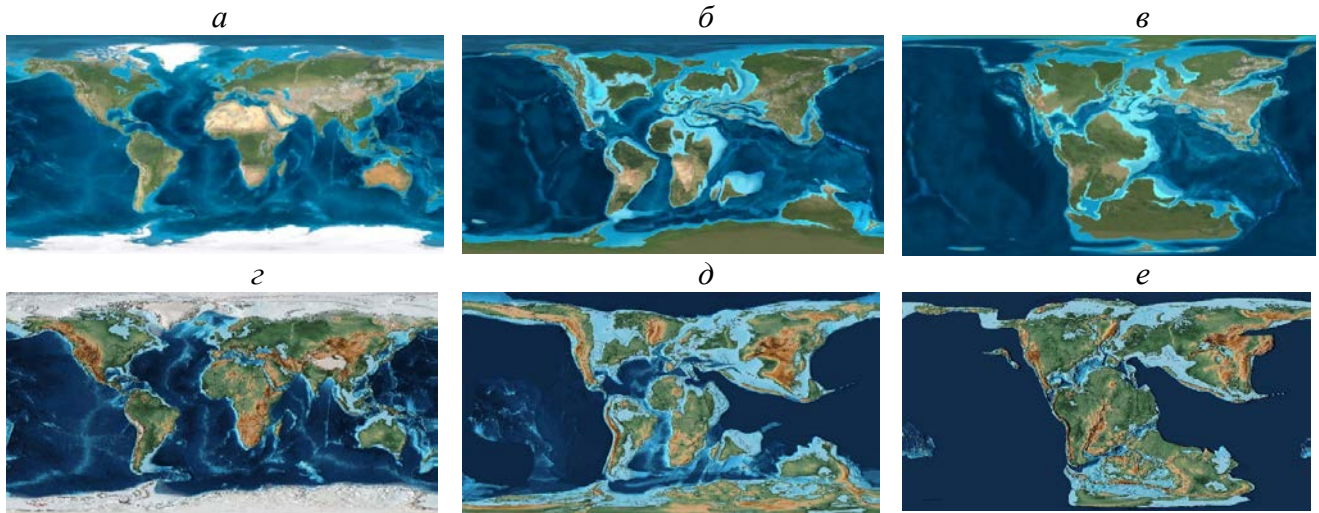


Рис. 5. Геопалеорекопструкції розміщення материків: а – теперішній час, б – 90 мільйонів років тому, в – 150 мільйонів років тому [Blakey R., 2016]; г – теперішній час, д – 90 мільйонів років тому, е – 150 мільйонів років тому [Scotese C., 2017]

Звернемо насамперед увагу на траєкторію розташування північного полюса фігури двовісного еліпсоїда, який апроксимує поверхню літосфери Землі в різні періоди геологічної історії, яка зображена на рис. 6. Максимальне відхилення полюса малої півосі серед отриманих еліпсоїдів від північного полюса Землі не перевищує $3^{\circ},1$ (це значення отримане за даними моделювання за геопалеорекопструкціями С. Scotese і мабуть, воно близьке до критичного), що підтверджує припущення про переміщення літосферних плит, яке підпорядковується геодинамічному процесу, направленому на відновлення осової симетрії і збереження моменту кількості обертання. Відзначимо також те, що в положенні полюса чітко простежуються два найбільші відхилення від осі обертання, це в сучасний період і приблизно через 400 млн. років тому, а в часовому інтервалі 100-300 млн. років відхилення полюса фігури літосфери знаходилось в межах 1° .

Наступна група графіків рис.7 – 10 ілюструють результати комп'ютерного моделювання трансформації фігури літосфери Землі. Конфігурація зміни параметрів в обох випадках на переважній більшості епох є подібною і на цих рисунках можна виділити стрімкі зміни відповідних параметрів в період часу від 600 млн. років до 500 млн. років. Для зміни осей та стиснення в період від 500 млн. років до сьогодні характерна трендова закономірність з флуктуаціями, а саме поступове збільшення малої і великої осей в діапазоні приблизно 2,7 км та стиснення двовісного еліпсоїда від 1/335 до 1/290. Цікавими виявилися графіки зміни різниці великої і малої осей тривісного еліпсоїда в площині екватора, які показані на рис.10. Вони показують чітку трансформацію двовісного еліпсоїда в тривісний, що відбувалась 400 млн. років тому. В той період геологічного

часу материкова і океанічна поверхня літосфери найкраще описувалась тривісним еліпсоїдом з різницею осей в екваторіальній площині $\sim 3,2$ км, а 50 млн. років потому аналогічний показник сягав лише 0,5 км. В нинішній час цей показник становить 1,5 км. З отриманих розрахунків також відстежується, що середній радіус Землі збільшився за 600 млн. років майже на 1 км, а об'єм Землі за цей період геологічного часу у відсотках відносно нинішнього стану побільшав на 0,04%. Отже, отримані результати та дані вертикальних зміщень перманентних станцій GNSS можуть давати підставу для припущення щодо розширення Землі. Ця гіпотеза охоплює все ширше коло прихильників серед науковців, які вивчають еволюцію Землі, і має цілком вагоме обґрунтування.

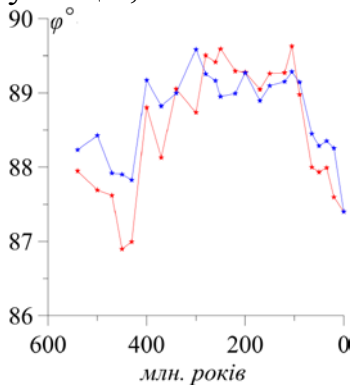


Рис.6. Графіки зміни широти північного полюса малої осі двовісного еліпсоїда (червоний колір – за даними C. Scotese, синій колір – за даними R. Blakey)

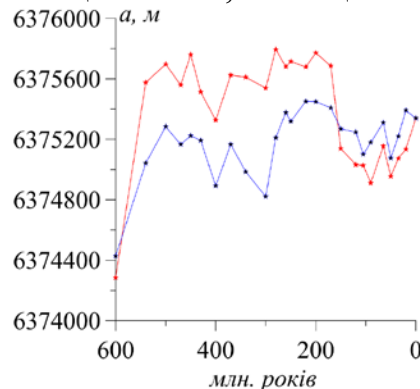


Рис.7. Графіки зміни великої осі двовісного еліпсоїда (червоний колір – за даними C. Scotese, синій колір – за даними R. Blakey)

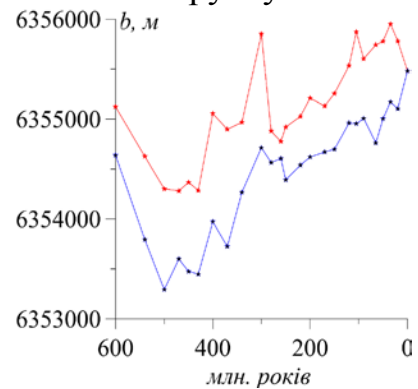


Рис.8. Графіки зміни малої осі двовісного еліпсоїда (червоний колір – за даними C. Scotese, синій колір – за даними R. Blakey)

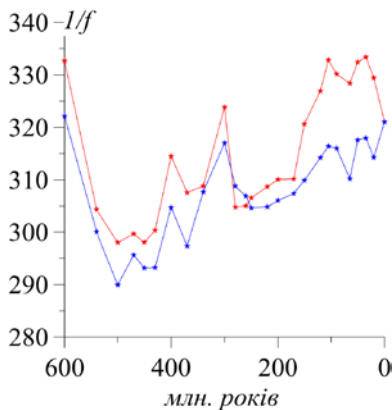


Рис.9. Графіки зміни стиснення двовісного еліпсоїда (червоний колір – за даними C. Scotese, синій колір – за даними R. Blakey)

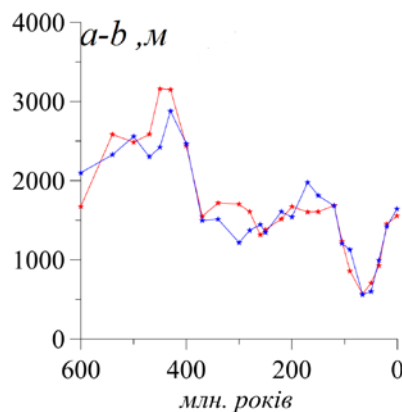


Рис.10. Графіки зміни різниці півосей в екваторіальній площині тривісного еліпсоїда (червоний колір – за даними C. Scotese, синій колір – за даними R. Blakey)

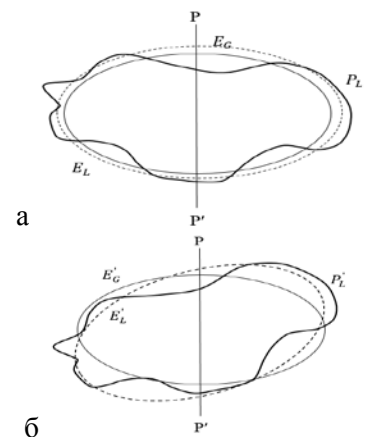


Рис.11. Схематична ілюстрація формування фігури Землі: а – в початковий період, коли Земля була ближче до гідростатичного стану; б – сучасний стан фігури і поверхні літосфери Землі

Розглянемо тепер постановку задачі визначення тангенціальних масових сил, що виникають внаслідок зміни положення осі фігури літосфери відносно осі обертання. Схематична ілюстрація еволюційного формування фігури Землі

показана на рис.11, де введені такі позначення: PP' – вісь обертання, P_L – поверхня літосфери, E_L – еліпсоїд, який найкраще підходить до поверхні літосфери, E_G – еліпсоїд, який зображає фігуру Землі в далеку геологічну епоху; всі попередні позначення на рис. 11 *a* підписані зі штрихом на рис.11 *б* для фігури і поверхні літосфери Землі в сучасну епоху. Якщо співставити два положення зовнішніх оболонок Землі на рис. 11 *a* і 11 *б*, то можна допустити виникнення напруженого стану через зміну положення осі фігури літосфери відносно осі обертання.

Введемо поняття «геоеволюційного» відхилення виска і припустимо, що тангенціальні сили пропорційні куту γ між напрямком ліній виска в минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком в заданій точці (рис.12). Зауважимо, що еліпсоїд E_L в минулому наближено представляв рівневу поверхню нашої планети. Тепер йому відповідає еліпсоїд E'_L . Враховуючи відстань S між еліпсоїдами E'_G і E'_L і визначення складових «геоеволюційного» виска $\xi = \frac{1}{R} \frac{\partial S}{\partial \varphi_0}$, $\eta = \frac{1}{R \cos \varphi_0} \frac{\partial S}{\partial \lambda_0}$, та виконавши перехід до складових тангенціальних масових сил, діючих на одиничну масу у верхньому шарі планети, отримуємо:

$$S = a - a_0 + (a_0 \alpha_0 - a \alpha \cos^2 \zeta) \sin^2 \varphi_0 - a \alpha \sin^2 \zeta \cos^2 \varphi_0 \sin^2 \lambda_0 + \frac{1}{2} a \alpha \sin 2\zeta \sin 2\varphi_0 \sin \lambda_0.$$

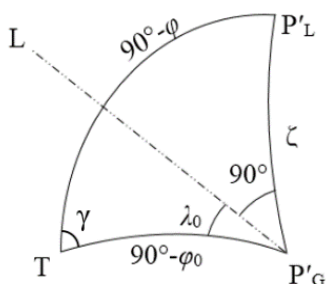


Рис. 12. Ілюстрація до визначення кута γ

$$A = a - a_0; B = a_0 \alpha_0 - a \alpha \cos^2 \zeta; C = -a \alpha \sin^2 \zeta; D = \frac{1}{2} a \alpha \sin 2\zeta.$$

$$F_\varphi = \frac{2Bg}{R} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 - \frac{2Cg}{R} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \sin^2 \lambda_0 + \frac{2Dg}{R} \cos 2\varphi_0 \sin \lambda_0$$

$$F_\lambda = \frac{2Cg}{R} \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 \cos \lambda_0 + \frac{2Dg}{R} \sin \varphi_0 \cos \lambda_0$$

де g – середнє значення прискорення сили тяжіння, R – середній радіус Землі, φ_0 і λ_0 – широта і довгота точки T .

На рис. 13 показана карта з нанесеними ізолініями висот, які визначають відстані S між поверхнями еліпсоїдів, що узагальнено представляють літосферу Землі і геоїд. На цій карті у вигляді широких дугоподібних смуг відображені названі нами умовно «тектонічний вододіл» і «тектонічний тальвег», які характеризують відповідно найбільші підняття і опускання еліпсоїда, що апроксимує поверхню літосфери відносно поверхні загальноземного еліпсоїда, що відображає геоїд. Як виявилось, ці смуги «тектонічного вододілу» і «тектонічного тальвегу» переважно охоплюють всі границі тектонічних плит (за винятком Південно - Американської і Тихоокеанської плити). Таким чином, ці дві смуги планетарного підняття і опускання фігури літосфери над геоїдом, які в генерелізованому вигляді відображають своєрідний структурний планетарний «вододіл» і «тальвег» на земній кулі, можливо впливали на формування границь основних літосферних плит. Тому поверхню літосфери можна розглядати в

узагальненому вигляді як деформаційний еліпсоїд, на якому чітко відстежуються глобальні зони відколювання, що співпадають з діагонально розміщеними полосами планетарного «вододілу» і «тальвегу». Ця виявлена закономірність наводить на думку про визначальну роль взаємного розташування двох еліпсоїдів, що апроксимують літосферу Землі і геоїд, та ротаційно-гравітаційних сил в структуроутворюючих процесах формування границь літосферних плит.

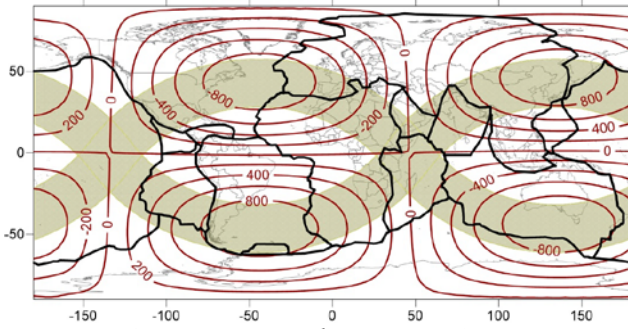
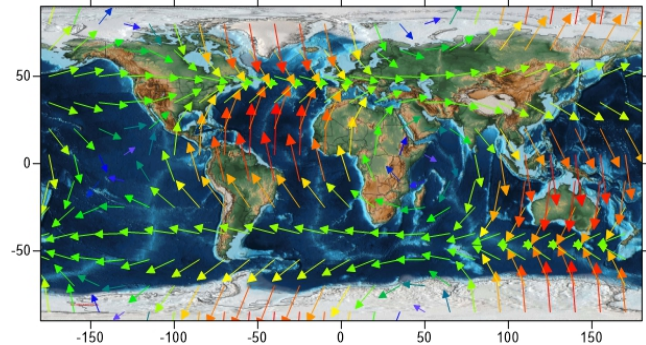
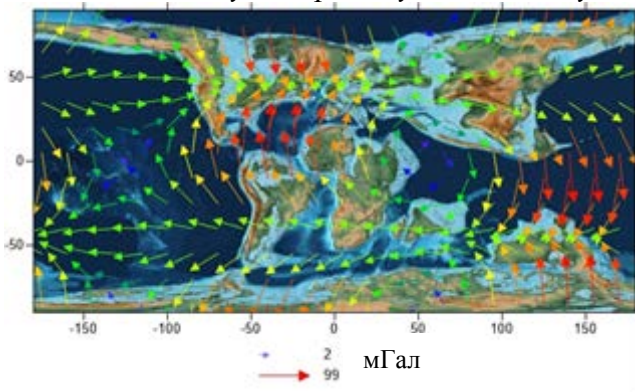


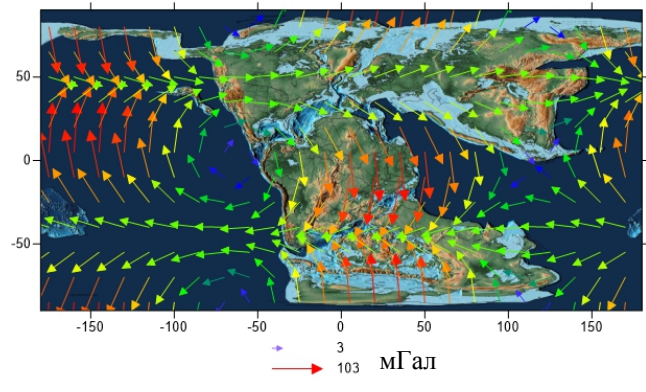
Рис. 13. Картографічне відображення відстаней між еліпсоїдами. Висоти подані в метрах. Криві смуги на рисунку відповідають «тектонічному водорозділу» і «тальвегу»



а



б



в

Рис.14. Карти тангенціальних масових сил на фоні материків і океанів. Стрілками показані тангенціальні сили в мілігалах а – теперішній час, б – 90 мільйонів років тому, в – 150 мільйонів років тому.

На рис.14 відображені тангенціальні масові сили, що виникають внаслідок зміни положення осі фігури літосфери відносно осі обертання. Відзначимо їх узгодженість з контурами материків, тобто стрілки векторів чітко вказують на напрямки руху тектонічних плит і переміщення материків та формування океанічної поверхні в процесі еволюції Землі. Важливо тут вказати на те, що представлена нами планетарна картина розподілу векторів тангенціальних масових сил дуже добре збігається з напрямком векторів горизонтальних зміщень перманентних станцій за GNSS вимірами. Якщо простежити весь ланцюжок просторово-часових змін в розташуванні материків і водної поверхні на растрових картах палеорекоконструкцій і зіставити їх з отриманими нами розподілом векторів тангенціальних масових сил, то можна помітити, що вихрова (обертальна) спрямованість векторів є домінуючою в переміщенні літосфери Землі. Пояснює такий розподіл тангенціальних масових сил взаємне розташування двох еліпсоїдів і орієнтація малої осі еліпсоїда, що описує

поверхню літосфери відносно осі обертання. Так, на рис.13, можна виявити чітку закономірність в розміщенні двох піднять і понижень одного еліпсоїда над іншим. Відповідно до такого розміщенням еліпсоїдів, формується розподіл напрямків векторів тангенціальних сил, під дією яких відбувається перетікання літосферних мас з височини в напрямку пониження. Епіцентр вихрового закручування тангенціальних масових сил збігається з точкою на екваторі, де практично стикаються нульові ізолінії, що розмежовують підняття і пониження в розподілі висот (відстаней) між поверхнями двох еліпсоїдів. Отже, внаслідок зміни орієнтації еліпсоїда, що описує літосферу, відбувається формування оновленого поля потенційних горизонтальних сил, які відповідно до збереження моменту кількості руху переміщують літосферні маси і генерують напруження та деформації в літосферній оболонці.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-практичне завдання формування моделей фігури літосфери Землі на основі результатів визначення висот планетарного рельєфу в сучасну епоху і за даними геопалеорекострукцій розміщення материків і океанічної поверхні в масштабі геологічного часу. В результаті виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Розроблено алгоритми, виконано кількісну оцінку параметрів двовісного і тривісного еліпсоїдів, що апроксимують фізичну поверхню Землі. Отримані результати показали, що полюси малої осі еліпсоїдів не співпадають з полюсами Землі і кут нахилу не перевищує 3° або ~ 300 км на дузі меридіану для будь-якої конфігурації розміщення материків і водної поверхні. Виявлена структурна асиметрія північної і південної півкуль вказує на наявність розширення південної півкулі і стиснення північної півкулі.

2. Дослідження змін параметрів двовісного та тривісного еліпсоїдів, що апроксимують висоти поверхні літосфери, на сучасну епоху за даними координат постійно діючих перманентних станцій GNSS встановили, що мала піввісь збільшилась на 72мм, а велика піввісь навпаки зменшилась на 25мм за період 2001 - 2016 рр. Середній радіус Землі за цей період часу збільшився майже на 5мм із швидкістю 0,3мм/рік. Отримані результати свідчать про трендову складову збільшення радіуса Землі і лінійну залежність від часу у зміщенні центру фігури за напрямком до північного полюса Землі.

3. Виконане комп'ютерне моделювання фігури літосфери Землі за даними геопалеорекострукцій розміщення материків і океанічної поверхні показало, що в період 50 млн. років потому Земля була близька до форми сфероїда, а в період 430–450 млн. років потому, навпаки – поверхню літосфери найкраще апроксимувала фігура тривісного еліпсоїда. З отриманих розрахунків також слідує, що середній радіус Землі збільшився за 600 млн. років майже на 1км, а об'єм Землі за цей період геологічного часу у відсотках відносно нинішнього стану побільшав на 0,04%.

4. Встановлено, що обчислені поля векторів тангенціальних масових сил показують хорошу узгодженість з напрямком просторово-часового

переміщення материків і тектонічних плит на Землі за даними горизонтальних зміщень перманентних станцій GNSS.

5. Просторово-часові особливості полів векторів тангенціальних масових сил на растрових картах геопалеореконокструкцій показують, що вихрова (обертова) спрямованість векторів є домінуючою в переміщенні літосфери Землі. Такий розподіл тангенціальних масових сил можна пояснити орієнтацією і взаємним розташуванням поверхонь двох еліпсоїдів, що узагальнюють геоїд і поверхню літосфери. Внаслідок зміни орієнтації еліпсоїда, що описує літосферу, відбувається формування оновленого поля потенційних горизонтальних сил, які переміщують літосферні маси і генерують напруження та деформації в літосферній оболонці. У міру підняття деякого об'єму речовини в процесі регіонального розширення значної території відбувається зміна орієнтації фігури літосфери Землі, що призводить до генерації горизонтальних сил, спрямованих на врівноважування симетрії щодо осі обертання.

6. Феноменальна картина розміщення на сфері Землі «тектонічного вододілу та тальвегу» вказує на те, що поверхню літосфери можна розглядати як деформаційний еліпсоїд, на якому чітко відстежуються глобальні зони відколювання, що співпадають з діагонально розміщеними полосами планетарного «вододілу» і «тальвегу». Виявлена закономірність наводить на думку про визначальну роль взаємного розташування двох еліпсоїдів, що апроксимують літосферу Землі і геоїд, та ротаційно-гравітаційних сил в структуроутворюючих процесах формування границь літосферних плит.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті в наукових періодичних виданнях іншої держави(США):

1. Tserklevych A. L., Zayats O. S., Shylo Y. O. (2017). Dynamics of the Earth shape transformation // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2017, Vol. 33, No. 3.–P. 130–141 (*SCOPUS*).
2. Tserklevych A. L., Zayats O. S., Shylo Y. O., Shylo O. M. Generation of the stressed state of the lithosphere of the Earth and Mars caused by the reorientation of their figures // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2018, Vol. 34, No. 1, pp. 19–36 (*SCOPUS*).

Статті в наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз даних:

3. Церклевич А. Л. Апроксимація висот фізичної поверхні Землі двовісним і тривісним еліпсоїдами / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // *Геодинаміка*. – 2016. – №1(20). – С.40-50 (*Index Copernicus, Web of Science*).
4. Церклевич А. Л. Про напружений стан тектоносфери Землі / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // *Геодинаміка*. – 2016. – №2(21). – С. 45–56 (*Index Copernicus, Web of Science*).
5. Церклевич А. Л., Фігура Землі і геодинаміка / А. Л. Церклевич, Є. О. Шило, О. М. Шило // *Геодинаміка*. - 2017. – №2(23). – С. 141-163 (*Index Copernicus, Web of Science*).

Стаття у фаховому виданні України:

6. Церклевич А. Л. Фігура літосфери Землі і геотектоніка / А. Л. Церклевич, Є.О.Шило // Доповіді НАН України. 2018. – №.1. – С. 67-72 (*академічне видання*).

Інші публікації, тези у збірниках матеріалів конференцій:

7. Церклевич А. Л. Динаміка трансформації фігури Землі / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // Кинематика и физика небесных тел. – 2017. – Т. 33, № 3. – С. 54–69 .
8. Церклевич А. Л. Генерация напряженного состояния литосферы Земли и Марса, обусловленная переориентацией их фигур / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило, О. М. Шило // Кинематика и физика небесных тел. 2018, – Т.34, № 1. – С. 30–56.
9. Шило Є. О. До питання про динаміку трансформації фігури Землі / Є. О. Шило, О. С. Заяць, А. Л. Церклевич // Програма та тези конференції ХХІ Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2016». – Львів. – 2016. – С. 35.
10. Церклевич А. Л. Планетарна динаміка вікових змін фігури Землі / А. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило // Матеріали ІІІ наукової конференції «Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі». – Львів-Верхнє Синьовидне. – 2016. – С.58-64.
11. Церклевич А. Л. Визначення «геоеволюційного» відхилення виска за даними трансформації фігури Землі / А. Л. Церклевич, Є. О. Шило // Матеріали VIII-ої міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні». – Ужгород: ФОП Сабов А. М. – 2016. – С.53-57.
12. Shylo O. The Definition of Deviation of “Goevolutionary” Plumb Line Based on Data from the Transformation of the Earth / O. Shylo, Ye. Shylo // 7th International youth science forum “LITTERIS ET ARTIBUS”. – Lviv. – 2017. – P.202-205.
13. Шило Є. О. Визначення тангенціальних сил за результатами трансформації фігури Землі / Є. О. Шило, О. М. Шило // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GEOTERRACE-2017» – Львів. – 2017. – С.68-70.

АНОТАЦІЯ

Шило Є.О. Моделювання трансформації фігури Землі і її впливу на геодинамічні процеси. – На правах рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – «Геодезія, фотограмметрія та картографія». Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

У дисертаційній роботі планетарна динаміка вікових змін форми Землі досліджується на основі результатів апроксимації висот поверхні літосфери двовісним і тривісним еліпсоїдами. За даними GNSS вимірювань на постійно

діючих перманентних станціях в північній і південній півкулях в сучасну епоху виявлені трендові закономірності вікових змін параметрів фігури Землі. Середній радіус Землі за період 2001 - 2016 р.р. збільшився майже на 5 мм із швидкістю 0,3 мм/рік.

На якісному і наближено кількісному рівні в результаті комп'ютерного моделювання цифрових моделей рельєфу поверхні літосфери на основі геопалеорекострукцій, показано, як в процесі еволюційного саморозвитку планети в результаті дії гравітаційно-ротаційних та ендогенних сил відбувається перерозподіл мас, що приводить до трансформації фігури літосфери від двовісного еліпсоїда до тривісного і навпаки, зміни сплюсненості та переміщення полюса в геологічному часі.

Виконані дослідження комп'ютерного моделювання переорієнтації фігури літосфери Землі, дозволили виявити певні закономірності структуроутворюючих процесів, внаслідок динамічного перерозподілу мас. Ввівши поняття «геоеволюційного» відхилення виска і припустивши, що тангенціальні сили пропорційні куту, який визначається як кут між напрямком лінії виска в минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком в заданій точці, розраховані діючі масові горизонтальні сили у верхній оболонці планети. Обчислені поля векторів тангенціальних сил показують хорошу узгодженість з результатами горизонтальних складових векторів руху станцій GNSS. Це свідчить про те, що взаємодія між собою блоків і плит у рамках вихрової ротаційно-гравітаційної моделі може бути взаємопов'язана пружними полями, які створюють єдине планетарне геодинамічне поле, що формує еволюційний стан геосередовища.

Ключові слова: двовісний і тривісний еліпсоїди, цифрова модель рельєфу поверхні літосфери Землі, переорієнтація фігури літосфери Землі, тангенціальні масові сили, геотектонічні і геодинамічні процеси.

АННОТАЦІЯ

Шило Е.А. Моделирование трансформации фигуры Земли и ее влияния на геодинамические процессы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - «Геодезия, фотограмметрия и картография». Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

В диссертационной работе планетарная динамика вековых изменений формы Земли исследуется на основе результатов аппроксимации высот поверхности литосферы двухосным и трехосным эллипсоидами. По данным GNSS измерений на постоянно действующих перманентных станциях в северном и южном полушариях в современную эпоху обнаружены трендовые закономерности вековых изменений параметров фигуры Земли. Средний радиус Земли в период с 2001 по 2016 год. увеличился почти на 5 мм со скоростью 0,3 мм / год.

На качественном и приближенно количественном уровне в результате компьютерного моделирования цифровых моделей рельефа поверхности литосферы на основе геопалеорекострукций, показано, как в процессе

эволюционного саморазвития планеты в результате действия гравитационно-ротационных и эндогенных сил происходит перераспределение масс, которое приводит к трансформации фигуры литосферы от двухосного эллипсоида к трехосному и наоборот, изменения сжатия и перемещения полюса в геологическом времени.

Выполненные исследования компьютерного моделирования переориентации фигуры литосферы Земли позволили выявить определенные закономерности структурообразующих процессов в результате динамического перераспределения масс. Введя понятие «геоэволюционного» отклонения отвеса и предположив, что тангенциальные силы пропорциональны углу, который определяется как угол между направлением линии отвеса в прошедшую геологическую эпоху и нынешним направлением в заданной точке, рассчитаны действующие массовые тангенциальные силы в верхней оболочке планеты. Вычисленные поля векторов тангенциальных сил показывают хорошую согласованность с результатами горизонтальных составляющих векторов движения станций GNSS. Это свидетельствует о том, что взаимодействие между собой блоков и плит в рамках вихревой ротационно-гравитационной модели может быть взаимосвязана упругими полями, которые создают единое планетарное геодинамическое поле, формирующее эволюционное состояние геосреды.

Ключевые слова: двухосный и трехосный эллипсоиды, цифровая модель рельефа поверхности литосферы Земли, переориентация фигуры литосферы Земли, тангенциальные массовые силы, геотектонические и геодинамические процессы.

ANNOTATION

Shylo Y.O. Earth's shape transformation modeling and its influence on geodynamic processes. - On the rights of manuscript.

Thesis for a PhD degree by specialty 05.24.01 – Geodesy, Photogrammetry and Cartography. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The planetary dynamics of secular changes of the Earth's shape that is determined on the base of approximation of the lithosphere surface heights that are changing during geological epochs by biaxial and triaxial ellipsoids are investigated in the dissertation. Based on the GNSS data at permanent stations in the northern and southern hemispheres for the modern epoch it is determined that the small half-axis increased by 72 mm, and the large half-axis, on the contrary, decreased by 25 mm in the period from 2001 to 2016. The obtained results testify to the trend component of increasing the radius of the Earth and the linear dependence on time in the displacing center of the figure in the direction to the North Pole of the Earth.

The computer modeling of lithosphere surface heights (DEMs) for different geological epochs was made on the basis of two geopaleoreconstructions models. The analysis of obtained DEMs shows at a qualitative and approximately quantitative level such results: the changes in flattening and the pole position in geological time; transformation lithosphere shape from a biaxial ellipsoid to a triaxle and vice versa as

a result of action of gravitational-rotational and endogenic forces consequence in masses redistribution. The maximum deviation of the pole of the minor axis among the ellipsoids obtained from the North pole of the Earth does not exceed $3^{\circ},1$ (this value, perhaps, approaches the critical one), which confirms the assumption about the movement of lithospheric plates, which obeys the geodynamic process aimed at restoring axial symmetry and preserving the moment amounts of rotation. In the pole position, two of the largest deviations from the axis of rotation are clearly visible; this is in the modern period and approximately 400 million years later. In the time interval 100-300 million years the deviations of the pole of the lithosphere figure were within 1° .

The performed investigations of the Earth's lithosphere figure reorientation as a result of dynamic mass redistribution allow revealing certain regularities of structure-forming processes. Introducing the concept of «geoevolutionary deviation of the plumb line» and assuming that the tangential mass forces are proportional to the angle, between the direction of the plumb line in the past geological epoch and the current direction at a given point, horizontally acting forces in the upper shell of the planet were computed. The computed fields of the tangential forces show good consistency with the results of the horizontal components of GNSS stations moving vectors. This is quite convincing evidence that the interaction between blocks and plates within the vortex rotational-gravitational model can be interconnected by elastic fields that create a single planetary geodynamic field that forms the evolutionary state of the geoenvironment.

Key words: biaxial and triaxle ellipsoids, digital elevation model of the Earth's lithosphere surface, reorientation of the Earth's lithosphere figure, tangential mass forces, geotectonic and geodynamic processes.