

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

САВЧИН Ігор Романович

УДК 551.24/550.3/531.1

**ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ КІНЕМАТИКИ ТЕКТОНІЧНИХ СТРУКТУР ЗА ДАНИМИ
ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої геодезії і астрономії Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
ТРЕТЯК Корнелій Романович,
Національний університет «Львівська
політехніка», директор інституту геодезії.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
МАКСИМЧУК Валентин Юхимович,
Карпатське відділення Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна НАН України, радник
при дирекції, член-кореспондент НАН
України;

доктор технічних наук, професор
АННЕНКОВ Андрій Олександрович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури, професор
кафедри інженерної геодезії;

доктор технічних наук, професор
ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій Іванович,
Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, завідувач кафедри
геоінформатики ННІ «Інститут геології».

Захист відбудеться *17 жовтня 2024 р. о 11⁰⁰* годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Реферат розісланий *09 вересня 2024 р.*

**Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.12**

к.т.н., доц. Андрій СОГОР

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток та доступність технологій глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), а також розвинена інфраструктура мереж перманентних ГНСС-станцій, що охоплює всі материки й велику кількість островів, забезпечили можливість накопичення довготривалих рядів спостережень. Вони є джерелом інформації про динаміку сучасних рухів земної поверхні, яка визначається на основі зміщень перманентних ГНСС-станцій, котрі на ній розташовані. Комплексний аналіз, узагальнення та інтерпретація рухів земної поверхні в межах певних тектонічних структур (під якими розуміють різноманітні частини земної кори) забезпечує можливість визначення рухів земної кори, нижня границя якої описується поверхнею Мохоровичича. Розвиток геодезичних методів за останнє десятиліття, з безпрецедентними досягненнями в точному виявленні та моніторингу просторових рухів на міліметровому рівні, відкрила нові перспективи для вивчення кінематики і геодинаміки Землі. Однак такі досягнення, у поєднанні з великою кількістю зібраних, а також безперервним накопиченням нових даних, порушують питання необхідності розроблення нових та удосконалення наявних методів їх опрацювання, аналізу й використання для подальшої інтерпретації геодинамічних процесів.

Неабиякий науковий і практичний інтерес викликає використання даних перманентних ГНСС-станцій для побудови нових та оновлення наявних моделей сучасних рухів земної кори. В основі таких досліджень є теорема, запропонована Л. Ейлером у 1776 році *«Рух будь-якого твердого тіла по поверхні кулі можна описати як обертання навколо осі, що проходить через центр цієї кулі»*. Використовуючи цю теорему, можемо визначити ротаційні параметри (кутову швидкість обертання та параметри умовної осі, навколо якої відбувається обертання), що описують динаміку руху земної кори в межах окремих тектонічних структур (в основному тектонічних плит) і забезпечують можливість аналізу та прогнозування таких рухів.

Динаміка руху земної кори вимагає постійного оновлення моделей її сучасних рухів. Їх актуальність полягає в тому, що такі моделі відкривають нові можливості для комплексного аналізу, диференціації кінематики тектонічних структур та прогнозування геодинамічних процесів, а також глибшого розуміння взаємозв'язків між ними. Розроблення та дослідження таких моделей не тільки сприяє науковому прогресу, але й має вагомим практичне значення для гарантування безпеки й сталого розвитку суспільства, через можливість попередження природних катастроф та сприяння зменшенню їхнього негативного впливу на населення й інфраструктуру. Розвиток мереж перманентних ГНСС-станцій забезпечив можливість уточнення моделей сучасних рухів земної кори в регіонах, для яких такі моделі будувались винятково на основі припущень. У наш час є достатньо даних ГНСС-вимірювань для уточнення моделей сучасних рухів земної кори основних тектонічних плит, а саме: 7-ми великих (Тихоокеанської, Північноамериканської, Євразійської, Африканської, Антарктичної, Австралійської та Південноамериканської), 7-ми середніх (Сомалійської, Індійської, Філіппінської, Амурської, Аравійської, Карибської та Янцзиської) та 3-х дрібних (Альпійської, Анатолійської та Окінавської). Не менш важливим є те, що ротаційні параметри тектонічних структур стали основою для розроблення нових та уточнення наявних земних референціальних систем координат, які є необхідними для розв'язання більшості геодезичних задач. Надзвичайно актуальним завданням є

забезпечення точності, надійності та стабільності земних референцних систем координат через постійне врахування сучасних геодинамічних процесів.

Відомо, що ротаційні параметри, які є основою моделей сучасних рухів земної кори, є динамічними, очевидно, їх динаміка спричинена нерівномірністю обертання Землі та пов'язана із перерозподілом динамічних параметрів тектонічних структур. Під динамічними параметрами тектонічних структур розуміємо параметри, які характеризують взаємодію тектонічних структур у русі. До таких параметрів відносять момент інерції, момент імпульсу та кінетичну енергію. Ураховуючи фундаментальний закон збереження (а саме: закон збереження імпульсу та закон збереження енергії), можна припустити, що зміни динамічних параметрів тектонічних структур взаємно компенсуються для збереження моменту імпульсу та кінетичної енергії Землі сталими. У зв'язку з цим актуальним є розроблення методик для визначення динамічних параметрів тектонічних структур, а також оцінювання просторово-часового взаємозв'язку між зміною цих параметрів і нерівномірністю обертання Землі. Такі взаємозв'язки є необхідними для розуміння фундаментальних процесів у тілі Землі, особливо якщо врахувати систематичне зростання швидкості обертання Землі після 2016 року.

Не менш важливим є розроблення нових та удосконалення наявних методів опрацювання та аналізу вимірювань перманентних ГНСС-станцій для побудови моделей деформацій земної кори, які дають можливість оперативно моніторити геодинамічні процеси й ідентифікувати зони підвищеного ризику. Відомо, що геодинамічні процеси є головним рушієм розвитку та зміни земної кори, наприклад: виникнення землетрусів, виверження вулканів, обміління морських басейнів і гороутворення. Геодинамічні процеси є чинниками виникнення деформаційних процесів, які можна описати з використанням деформаційних параметрів. Залежно від їх прояву в просторі геодинамічні та деформаційні процеси поділяються на:

- глобальні, які належать до всієї Землі в цілому, яка при їх інтерпретації замінюється деякою ідеальною та порівняно однорідною моделлю;
- великомасштабні, до яких відносяться території протяжністю 10^3 – 10^4 км, тобто, мають масштаби континентів або їх значних частин;
- регіональні, до яких належать території протяжністю 10^2 – 10^3 км, можуть охоплювати гірські системи, тектонічні розломи;
- локальні, до яких відносяться території протяжністю менше 10^2 км, тобто, будь-які невеликі за площею тектонічні структури та техногенні території.

Значний науковий інтерес викликають дослідження великомасштабних деформаційних процесів у регіонах, де немає густої мережі перманентних ГНСС-станцій. Серед таких необхідно виділити Антарктичну тектонічну плиту та Африканську систему тектонічних плит, які характеризуються різними геодинамічними процесами. Активна в геодинамічному розумінні Африканська система тектонічних плит відповідальна за численні геологічні особливості і явища, які спостерігаються в Африці та прилеглих регіонах, включно з формуванням рифтових долин, гірських хребтів, басейнів і плато, а також за сейсмічну активність регіону. Саме тому актуальність диференціації таких деформаційних процесів не можна недооцінювати. Натомість, особливість Антарктичної тектонічної плити полягає в тому, що вона позбавлена техногенного впливу, який може спотворювати геодинамічні процеси, тому такі дослідження можуть слугувати еталоном для аналізу та дослідження інших тектонічних структур.

Особливий інтерес викликають також дослідження регіональних деформаційних процесів у межах тектонічних розломів, оскільки там відбуваються найактивніші деформації. У цьому випадку доволі цікавим є розлом протоки Пенола – каналу Лемера, розташований у межах Антарктичної тектонічної плити, який також позбавлений впливу факторів техногенного характеру, тому може виконувати функцію прогностичного полігону для таких досліджень.

У період російської військової агресії, яка супроводжується активними обстрілами енергетичних об'єктів, особливої актуальності набуває моніторинг локальних деформаційних процесів на територіях, де розташовані такі об'єкти. Диференціація кінематики локальних деформаційних процесів у межах таких територій забезпечить можливість прогнозувати методи безпечної експлуатації цих об'єктів і енергетичну стабільність України під час війни. Особливо актуальним є проведення таких досліджень для території Дністровської ГАЕС, яка через свою велику потужність, а також гідроаккумуляційні особливості є критично важливою для енергетичної системи нашої держави.

Вагомий внесок для розв'язання проблем дослідження моделей руху різних тектонічних структур, дослідження динамічних параметрів різних тектонічних структур, деформаційних процесів різних тектонічних структур зробили такі вітчизняні вчені: К. Третьак, О. Марченко, В. Максимчук, А. Церклевич, Ф. Заблоцький, С. Савчук, М. Іщенко, О. Смірнова, О. Серант, Ю. Голубінка, А. Вовк та інші, а також закордонні – Z. Altamimi, C. DeMets, D. Argus, G. Sella, H. Drewes, C. Kreemer, M. Goudarzi, M. Heflin, R. Gordon, X. Collilieux, A. Schettino, C. Bowin, D. Bercovici, N. Swedan, P. Olson, S. Jin, T. Soler, Z. Shen, T. Sagiya, V. Cronin, P. Resor, I. Lazos та інші.

У зв'язку з означеними питаннями дисертаційна робота присвячена розв'язку поставлених актуальних проблем диференціації кінематики тектонічних структур за даними проведених та вільно доступних ГНСС-вимірювань на глобальному, регіональному та локальному рівнях для забезпечення кращого розуміння сучасних геодинамічних процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковому напряму кафедри вищої геодезії та астрономії «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань». Робота пов'язана з планами, темами і науковою тематикою робіт галузевої науково-дослідної лабораторії «Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Результати дисертаційної роботи були впроваджені під час виконання науково-дослідних робіт у рамках «Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки» (Постанова Кабінету Міністрів України від 03.11.2010 р. № 1002 «Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки» {із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України №88 від 18.01.2012; №970 від 24.10.2012; №488 від 11.07.2013; №708 від 24.12.2014; №397 від 23.05.2018; №32 від 20.01.2021}, а саме:

- *Дослідження сучасної геодинаміки земної кори на геофізичному та геодезичному полігонах в районі антарктичної станції «Академік Вернадський» (0118U007210с, № Н/06-2018 від 19.11.2018 р.).*

- Дослідження сучасних рухів земної кори в районі, прилеглому до антарктичної станції «Академік Вернадський», активності тектонічного розлому в районі протоки Пенола (0119U103218, № Н/06-2019 від 01.10.2019 р.).
- Просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між розподілом динамічних параметрів Антарктичної тектонічної плити і моментом імпульсу Землі, атмосфери та океану (0120U104495, № Н/18-2020 від 21.09.2020 р.).
- Дослідження на глобальному, регіональному та локальному рівні сучасних просторових рухів земної кори Антарктиди та встановлення їх взаємозв'язку з динамікою гідросфери (0121U112434 № Н/22-2021 від 16.07.2021 р.).

Вхідні дані для виконання дисертаційних досліджень частково отримані автором в рамках:

- Виконання наукових і науково-технічних робіт під час 23-ої та 24-ої сезонних українських антарктичних експедицій у 2018–2019 роках на антарктичній станції «Академік Вернадський» згідно з Державною цільовою науково-технічною програмою проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2020 роки.
- Виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт «Дністровська ГАЕС. Визначення горизонтальних переміщень пунктів опорної геодезичної мережі методом GPS» (0117U0007363, 2013–2021 рр. на замовлення ТзОВ «Укргідропроєкт»).

Мета і завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є розроблення нових та удосконалення наявних методів диференціації кінематики тектонічних структур за даними проведених та вільно доступних ГНСС-вимірювань. Для досягнення цієї мети в роботі поставлено такі завдання:

- удосконалити методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит;
- уточнити модель сучасних рухів основних тектонічних плит за період 2002–2021 років;
- розробити методику визначення динамічних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань;
- оцінити просторово-часові взаємозв'язки між розподілом ротаційних та динамічних параметрів основних тектонічних плит, а також нерівномірністю обертання Землі за період 2002–2021 років;
- удосконалити методику визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань;
- оцінити сучасні геодинамічні процеси в межах Антарктичної тектонічної плити та Африканської системи тектонічних плит;
- оцінити сучасні регіональні геодинамічні процеси в межах тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера, спричинені природними процесами;
- оцінити сучасні локальні геодинамічні процеси в межах території Дністровської ГАЕС, спричинені техногенними процесами.

Об'єктом дослідження є тектонічні структури, а саме: 7 великих (Тихоокеанська, Північноамериканська, Євразійська, Африканська, Антарктична, Австралійська та Південноамериканська), 7 середніх (Сомалійська, Індійська, Філіппінська, Амурська,

Аравійська, Карибська та Янцзиська) та 3 дрібних (Альтіпланська, Анатолійська та Окінавська) тектонічні плити, а також тектонічний розлом протоки Пенола – каналу Лемера (Антарктида) та територія Дністровської ГАЕС (Україна).

Предметом досліджень є рухи земної кори, ротаційні параметри тектонічних структур, динамічні параметри тектонічних структур, геодинамічні процеси, деформаційні параметри.

Методи дослідження охоплюють збір даних, їх аналіз, фільтрацію, опрацювання та інтерпретацію одержаних результатів та ґрунтуються на системно-структурному підході, який поєднує теорію математичної обробки та інтерпретацію результатів геодезичних спостережень, математичні методи вивчення динамічних систем, тензорний та кореляційний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні нових та удосконаленні наявних методик та алгоритмів, які дають змогу удосконалити процес диференціації кінематики тектонічних структур.

- 1) Удосконалено методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит шляхом урахування безперервності та рівномірності розподілу ГНСС-вимірювань упродовж спостережень.
- 2) Уточнено модель сучасних рухів 7-ми великих, 7-ми середніх та 3-х дрібних тектонічних плит за період 2002–2021 років у системі координат ITRF2014/IGS14. Отримані значення характеризуються вищою точністю у порівнянні з відомими моделями.
- 3) Вперше розроблено методику та визначено динамічні параметри основних тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань, а також інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, отриманої із моделі CRUST1.0.
- 4) Вперше визначено просторово-часові взаємозв'язки між розподілом ротаційних і динамічних параметрів основних тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі.
- 5) Уточнено параметри сучасних геодинамічних процесів в межах Антарктичної тектонічної плити шляхом врахування результатів вимірювань інстальованої та введеної у дію автором біля Української антарктичної станції «Академік Вернадський» першої української перманентної ГНСС-станції в Антарктиді – ASAV.
- 6) Уточнено параметри сучасних геодинамічних процесів у межах Африканської системи тектонічних плит за період 2002–2021 років шляхом урахування сезонності деформаційних процесів.
- 7) Запропоновано нову кінематичну модель сучасних регіональних природних геодинамічних процесів в межах тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера (Антарктида) на основі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній.
- 8) Оцінено параметри сучасних локальних техногенних геодинамічних процесів в межах території Дністровської ГАЕС на основі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній. Висловлено обґрунтоване припущення, що Дністровський гідроенергетичний комплекс можна вважати одним із об'єктів, де зафіксовано явище наведеної сейсмічності.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень:

- визначено ротаційні параметри основних тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань та уточнено модель сучасних рухів земної кори, які є основою для прогнозування сучасних геодинамічних процесів і уточнення наявних та розроблення нових систем координат;
- визначено динамічні параметри основних тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань, а також інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, отриманої із моделі CRUST1.0;
- інстальовано та введено у дію біля Української антарктичної станції «Академік Вернадський» першу українську перманентну ГНСС-станцію в Антарктиді – ASAV;
- уточнено параметри сучасних геодинамічних процесів у межах Антарктичної тектонічної плити та Африканської системи тектонічних плит за період 2002–2021 років шляхом урахування сезонності деформаційних процесів;
- розширено геодинамічний полігон для моніторингу та дослідження сучасних геодинамічних процесів тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера шляхом закладення в лютому-квітні 2019 року шести додаткових пунктів;
- запропоновано нову кінематичну модель тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера;
- підтверджено, що територія Дністровської ГАЕС характеризується індуктивною сейсмічністю.

Додатково на основі теоретичних та експериментальних досліджень автором реалізовано три програмних продукти, які: дають можливість визначати:

- 1) сучасні значення ротаційних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань;
- 2) сучасні значення динамічних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань;
- 3) деформаційні параметри земної кори на основі даних ГНСС-вимірювань.

Результати дослідження впроваджено у навчальний процес для студентів II (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій у межах курсу «Космічна геодезія» та за спеціальністю 103 Науки про Землю в межах курсу «Космічна геодезія та геодинаміка». Також одержані результати використано у процесі підготовки магістерських кваліфікаційних робіт студентів за ОПП «Космічна геодезія» спеціальності 193 Геодезія та землеустрій.

Основні положення, що виносяться на захист.

- Теоретичне обґрунтування вдосконаленої методики визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань, яка підвищує точність визначення шляхом урахування безперервності та рівномірності розподілу даних упродовж спостережень.
- Уточнена модель сучасних рухів 7-ми великих, 7-ми середніх та 3-х дрібних тектонічних плит для періоду 2002–2021 років у системі координат ITRF2014/IGS14, що охоплює 92.59% поверхні Землі та забезпечує можливість прогнозування зміщень тектонічних плит з точністю до 20 мм.
- Теоретичне обґрунтування розробленої методики визначення динамічних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань, а також інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, отриманої з моделі CRUST1.0.

- Просторово-часові взаємозв'язки між розподілом ротаційних і динамічних параметрів основних тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі.
- Теоретичне обґрунтування вдосконаленої методики визначення деформаційних параметрів, яка використовує та поєднує наявні у вільному доступі часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій і результати періодичних (сезонних) ГНСС-вимірювань, а також враховує сезонність деформаційних процесів.
- Параметри сучасних деформаційних процесів у межах Антарктичної тектонічної плити та Африканської системи тектонічних плит, які отримані на основі опрацювання ГНСС-даних за період 2002–2021 років і враховують сезонність деформаційних процесів.
- Параметри сучасних регіональних природних деформаційних процесів у межах тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера, отримані з опрацювання ГНСС-вимірювань, проведених на природному геодинамічному полігоні, а також нова кінематична модель тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера.
- Параметри сучасних локальних техногенних деформаційних процесів у межах території Дністровської ГАЕС, отримані з опрацювання ГНСС-вимірювань, проведених на техногенному геодинамічному полігоні.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 29 наукових публікаціях, зокрема: 11 статей у наукових періодичних виданнях, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 3 статті у наукових фахових виданнях України; 5 публікацій у збірниках матеріалів конференцій, що входять до наукометричної бази даних Scopus; 10 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Особистий внесок автора полягає в здійсненні теоретичних та експериментальних досліджень, виведенні основних формул, опрацюванні виконаних вимірювань, формулюванні основних положень і висновків. Наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, є результатом самостійних напрацювань автора.

Одноосібно автором опубліковано 7 праць [6, 7, 9, 13, 18, 27 та 29], а 22 – у спів-авторстві [1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 та 28]. Особистий внесок автора полягає у здійсненні теоретичних та експериментальних досліджень, виведенні основних формул, опрацюванні виконаних вимірювань, формулюванні основних положень та висновків. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: постановка завдань, розроблення методів, алгоритмів, програм для проведення обчислень та інтерпретація отриманих результатів, а також формулювання висновків.

Наукові положення і результати, що виносились на захист у кандидатській дисертації, у цій роботі не використовувались.

Апробація результатів роботи відбувалася у вигляді доповідей на: XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2016» (Львів-Брюховичі, 13–15 квітня 2016 р.); VI Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (Львів, 24–26 листопада 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «GeoTerrace-2016» (Львів, 15–17 грудня 2016 р.); VIII Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» & 13-й Міжнародній конференції «Молоді вчені до викликів сучасної технології» (Львів, 22–24 листопада 2018 р.);

Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «GeoTerrace-2016» (Львів, 13–15 грудня 2018 р.); IX Міжнародній Антарктичній конференції, присвяченій 60-річчю підписання Договору про Антарктику від 1959 року в ім'я миру та розвитку, поглибленню міжнародної співпраці вчених в полярних регіонах (Київ, 14–16 травня 2019 р.); 9th SCAR Open Science Conference (Hobart, 31 July – 11 August 2020); International Conference of Young Professionals «GeoTerrace» (Lviv, October 7–9, 2020); X Міжнародній Антарктичній конференції, присвяченій 25-річчю підняття Державного прапора України на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (Київ, 11–13 травня 2021 р.); International Conference of Young Professionals «GeoTerrace» (Lviv, October 4–6, 2021); XV International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Kyiv, November 17–19, 2021); 10th SCAR Open Science Conference (Hyderabad, 1–10 August 2022); XXVII Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2024» (Львів-Брюховичі, 10–12 квітня 2024).

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі анотації, вступу, шести розділів, висновку, списку використаних джерел (280 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 250 сторінок, у тому числі 64 рисунки і 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, зазначено зв'язок роботи з науковими планами, з'ясовано стан дослідження проблеми, на розв'язання якої спрямовується науковий пошук, об'єкт і предмет дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, подано інформацію щодо апробації та публікації результатів дослідження.

У першому розділі «**Стан досліджень диференціації просторових рухів тектонічних структур на основі даних ГНСС-вимірювань**» проведено аналіз розвитку мереж перманентних ГНСС-станцій, розглянуто методи та сучасний стан опрацювання даних ГНСС-вимірювань. Також у даному розділі розглянуто методи побудови моделей сучасних рухів земної кори, проаналізовано теоретичні основи та описано шляхи використання даних перманентних ГНСС-станцій для створення таких моделей. Зосереджено увагу на моніторингу геодинамічних процесів із використанням ГНСС-даних.

У другому розділі «**Удосконалення методики визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань**» використовуючи процедури, засновані на методі найменших квадратів, запропоновано вдосконалену методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій (рис. 1).

Для забезпечення можливості максимального відтворення дослідження в якості вхідних даних методика передбачає використання: наявних у вільному доступі в Невадській геодезичній лабораторії (НГЛ) часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій, або будь-яких інших даних, підготовлених в аналогічному форматі; наявних у вільному доступі в НГЛ географічних координат перманентних ГНСС-станцій; вимог до часових рядів щоденних розв'язків і вимог до визначених швидкостей перманентних ГНСС-станцій.

Вихідними даними в методиці є: опрацьовані (фільтровані) часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій; визначені швидкості перманентних ГНСС-станцій; визначені ротаційні параметри досліджуваних тектонічних плит.

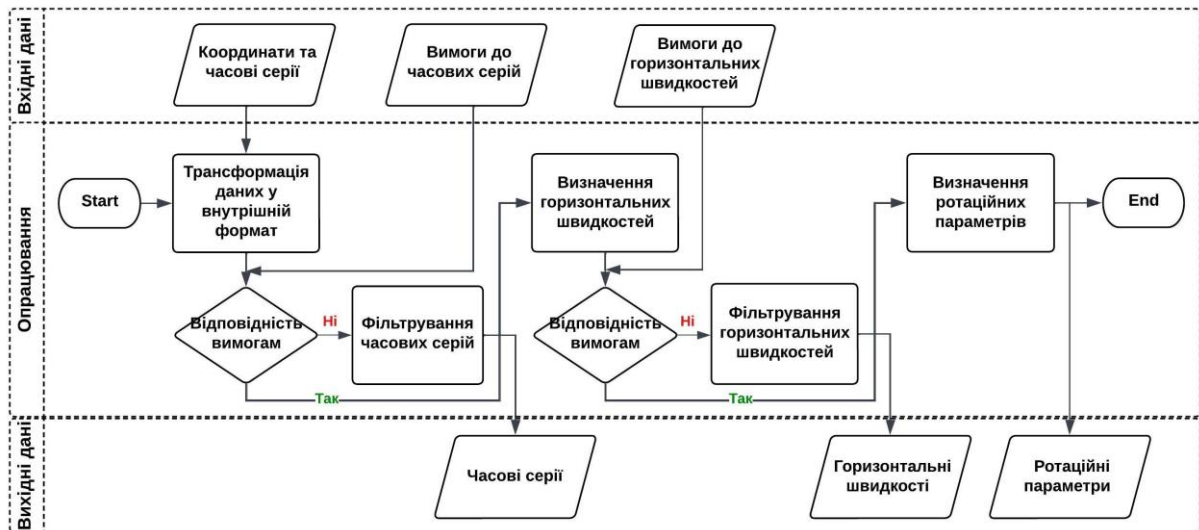


Рисунок 1 – Алгоритм визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій

Важливо відзначити, що координати та часові ряди щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій доступні на НГЛ у системі IGS14. Реалізація IGS14 була представлена в 2017 році паралельно з перевизначеною реалізацією ITRF2014. Параметри трансформації між реалізаціями ITRF2014 та IGS14 не публікувалися, оскільки передбачається, що їх глобальні значення дорівнюють нулю. У зв’язку з практичною ідентичністю цих систем, у роботі ми будемо оперувати аббревіатурою ITRF2014/IGS14.

Структурно запропонована методика передбачає 5 основних етапів (див. рис. 1):

1. *Трансформація даних у внутрішній формат.* Дані НГЛ структуровані окремим файлом для кожної перманентної ГНСС-станції, проте така структура не є зручною для спільного опрацювання. Тому на даному етапі вхідні дані трансформували у внутрішній формат. Результатом стала база даних, яка об’єднує часові ряди щоденних розв’язків з різних перманентних ГНСС-станцій.

2. *Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація часових рядів.* Відбір даних відбувається на основі критеріїв до перманентних ГНСС-станцій, наведених у Altamimi et. al., 2017. Зауважимо, що часові ряди щоденних розв’язків перманентних ГНСС-станцій, які мали одиночні грубі похибки та викиди, фільтрували та не додавали до опрацювання.

3. *Визначення швидкостей горизонтальних зміщень.* На даному етапі для всіх розв’язків перманентних ГНСС-станцій склали лінійні рівняння виду:

$$f(t_i) = v(t_i) + y_0 \quad (1)$$

де, t_i – епоха спостереження, v – лінійна швидкість перманентної ГНСС-станції та y_0 – зсув часового ряду (на епоху t_0 – початкова епоха).

Системи рівнянь для кожної компоненти розв’язували окремо методом найменших квадратів, визначали складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій, а також виконувалась оцінка точності визначених параметрів.

4. *Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація визначених швидкостей.* На даному етапі визначали та відбракували перманентні ГНСС-станції з низькою точністю визначення складових швидкостей горизонтальних зміщень, а також перманентні

ГНСС-станції з аномальними напрямками векторів. Швидкості, точність визначення яких була гіршою за 15% від значення швидкості, вилучали із опрацювання.

5. Визначення ротаційних параметрів. Для визначення ротаційних параметрів використовувалася математичний апарат, який ґрунтується на взаємозв'язку між компонентами швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій та ротаційних параметрів тектонічних плит:

$$V_{NE} = \begin{bmatrix} V_N \\ V_E \end{bmatrix} = \begin{cases} \omega \cdot R \cdot \cos \varphi_e \sin(\lambda - \lambda_e) \\ \omega \cdot R \cdot [\sin \varphi_e \cos \varphi - \cos \varphi_e \sin \varphi \cos(\lambda - \lambda_e)] \end{cases} \quad (2)$$

де, V_N, V_E – компоненти лінійної швидкості перманентної ГНСС-станції, φ, λ – координати розташування перманентної ГНСС-станції, $\omega, \varphi_e, \lambda_e$ – ротаційні параметри тектонічної плити.

Оскільки вимірювання перманентних ГНСС-станцій мають різну тривалість, а також розриви, то під час розв'язання системи рівнянь використовували вагу, яка враховує безперервність та рівномірність розподілу даних упродовж спостережень:

$$p = \frac{p_1 \cdot p_2}{m_v^2} \quad (3)$$

де, p_1 – вага за нерівномірність даних, p_2 – вага за безперервність даних, m_v^2 – середньоквадратична похибка визначення складових векторів швидкостей горизонтальних зміщень.

$$p_1 = 1 - \frac{2 \cdot |s_r - s_t|}{\Delta t}, \quad p_2 = 1 - \frac{4 \cdot \left| \frac{\Delta t}{4} - \delta t \right|}{\Delta t} \quad (4)$$

де, $s_r = \frac{t_0 + t_k}{2}$ – середня довжина усього інтервалу спостережень, яка не залежить від кількості розв'язків, t_k – епоха кінця спостереження, $s_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{k}$ – середня епоха всіх наявних розв'язків, k – кількість розв'язків, яка може не збігатися з середньою довжиною інтервалу спостережень s_r , $\Delta t = t_k - t_0$ – довжина інтервалу спостережень, $\delta t = \frac{\sum |t_i - s_t|}{k}$ – сума середнього відхилення епох усіх наявних розв'язків від s_t .

У результаті опрацювання отримували значення сучасних ротаційних параметрів тектонічної плити, а також точність їх визначення.

Сучасні моделі поділяють земну кулю на 56 тектонічних плит, серед яких 7 великих, 15 середніх та 34 мікроплити. Проте на значній кількості середніх та мікроплитах немає достатньої кількості якісних перманентних ГНСС-станцій. Тому апробацію методики виконано на прикладі тільки тих тектонічних плит, де є достатня кількість перманентних ГНСС-станцій, які відповідають вимогам. У результаті, до опрацювання включено часові ряди щоденних розв'язків 3169 перманентних ГНСС-станцій, розташованих на 7-ми великих (Тихоокеанська, Північноамериканська, Євразійська, Африканська, Антарктична, Австралійська, Південноамериканська), 7-ми середніх (Сомалійська, Індійська, Філіппінська, Амурська, Аравійська, Карибська, Янцзиська) та 3-х мікроплитах (Альтіпланська, Анатолійська, Окінавська).

Аналізуючи відібрані дані, можна стверджувати, що досліджувані тектонічні плити покривають 92.59% поверхні Землі, проте густота і рівномірність розташування відібраних перманентних ГНСС-станцій в їхніх межах є надзвичайно різною. Найменшу кількість перманентних ГНСС-станцій відібрано для Філіппінської та

Альтіпланської плит (12 та 15 відповідно), натомість найбільшу – для Північно-американської, Євразійської та Австралійської плит (965, 879 та 474 відповідно).

Використовуючи підготовлені вхідні дані, а також запропоновану удосконалену методику, визначено складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій, розташованих на 7-ми великих, 7-ми середніх та 3-х мікроплитах, за період 2002–2021 років у системі ITRF2014/IGS14. Розподіл визначених швидкостей представлено на рисунку 2.

Точність визначення складових швидкостей горизонтальних зміщень знаходиться в межах 0.9–6.4 мм/рік та складає в середньому 10–15% від довжини вектора. Отримані значення швидкостей порівняно із відомими моделями рухів тектонічних плит NNR-NUVEL1, REVEL2000, ITRF2000, APKIM2005, NNR-MORVEL56 та ITRF2014. Виявлено загалом, що отримані значення добре узгоджуються із порівнюваними моделями, найвища узгодженість ідентифікована для ITRF2014.

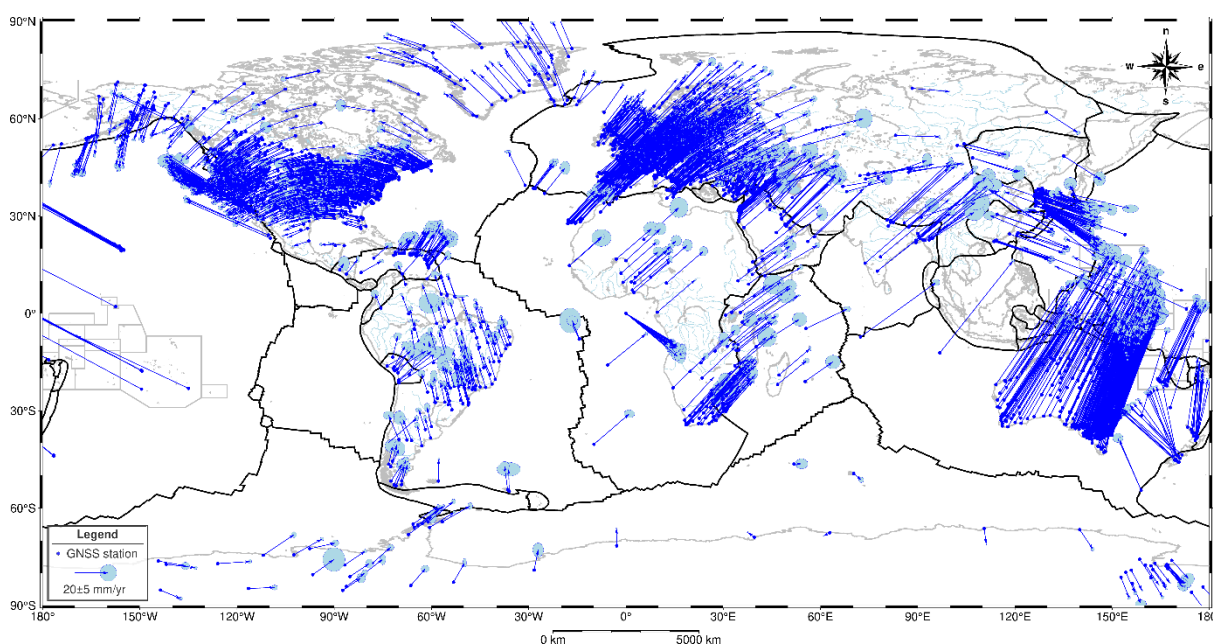


Рисунок 2. – Картосхема розподілу швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій

Отримані швидкості горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій використано для визначення ротаційних параметрів досліджуваних тектонічних плит на період 2002–2021 у системі координат ITRF2014/IGS14 (табл. 1).

Аналізуючи представлені результати, можна стверджувати, що точність визначення кутової швидкості знаходиться в діапазоні 0.001–0.206°/м.р. та складає в середньому 0.5–18.0% від значення кутової швидкості. Найвищою точністю визначення кутової швидкості характеризуються Північноамериканська, Євразійська, Африканська, Австралійська та Південноамериканська плити (0.001°/м.р), натомість найнижчою – Карибська, Анатолійська, Філіппінська, Окінавська та Альтіпланська плити (0.022–0.206°/м.р.). Точність визначення довготи знаходиться в діапазоні 0.089–1.927° і складає в середньому 0.1–2.0% від значення довготи. Найвищою точністю визначення довготи характеризується Австралійська плита (0.089°), натомість найнижчою – Окінавська та Карибська плити (1.813–1.927°). Точність визначення

широти знаходиться в діапазоні $0.040-1.428^\circ$ та складає в середньому $0.1-2.0\%$ від значення широти. Найвищою точністю визначення широти також характеризується Австралійська плита (0.040°), натомість найнижчою – Амурська та Янцзиська плити ($1.408-1.428^\circ$).

Таблиця 1

Визначені сучасні ротаційні параметри основних тектонічних плит на період 2002–2021 у системі координат ITRF2014/IGS14

Тип плити	Ідентифікатор плити	Ротаційні параметри			Точність визначення ротаційних параметрів		
		ω , $^\circ/\text{м.р.}$	φ_e , $^\circ N$	λ_e , $^\circ E$	m_ω , $^\circ/\text{м.р.}$	m_{φ_e} , $^\circ N$	m_{λ_e} , $^\circ E$
Велика плита	PA	0.665	-63.046	94.362	± 0.006	± 0.280	± 0.799
	NA	0.176	-11.766	-88.722	± 0.001	± 0.614	± 0.244
	EU	0.264	55.577	-96.888	± 0.001	± 0.186	± 0.350
	AF	0.274	48.949	-80.786	± 0.001	± 0.213	± 0.519
	AN	0.211	58.277	-126.531	± 0.002	± 0.348	± 0.417
	AU	0.637	32.647	36.957	± 0.001	± 0.040	± 0.089
	SA	0.122	-18.569	-130.232	± 0.001	± 0.531	± 1.434
Середня плита	SO	0.303	48.824	-93.855	± 0.003	± 0.153	± 1.119
	IN	0.525	51.980	2.623	± 0.005	± 0.163	± 1.144
	PS	1.200	-41.033	-34.479	± 0.098	± 1.205	± 1.153
	AM	0.327	71.209	-122.871	± 0.009	± 1.408	± 1.444
	AR	0.578	49.907	4.477	± 0.010	± 0.273	± 0.868
	CA	0.280	32.691	-95.533	± 0.022	± 1.161	± 1.927
	YA	0.320	69.617	-129.762	± 0.006	± 1.428	± 1.348
Мікро-плита	AP	1.152	-11.914	-77.284	± 0.206	± 0.906	± 1.108
	AT	1.359	41.992	25.896	± 0.057	± 0.239	± 0.382
	ON	1.308	39.783	146.054	± 0.110	± 0.939	± 1.813

Фактично представлені ротаційні параметри (див. табл. 1) є моделлю сучасних рухів досліджуваних тектонічних плит. Така модель може використовуватися для прогнозування й оцінювання сучасних рухів у будь-якій точці тектонічної плити. Оцінювання точності визначених за допомогою цієї моделі сучасних рухів можна виконати шляхом визначення середніх квадратичних похибок функцій виміряних величин на основі диференціювання виразів (2):

$$\begin{aligned}
 m_{V_N}^2 &= \omega^2 \cdot m_{\lambda_e}^2 \cdot \cos(\lambda - \lambda_e)^2 \cdot \cos^2 \varphi_e + m_\omega^2 \cdot \sin(\lambda - \lambda_e)^2 \\
 &\quad \cdot \cos^2 \varphi_e \\
 m_{V_E}^2 &= m_\omega^2 \cdot (\cos \varphi \cdot \sin \varphi_e - \cos(\lambda - \lambda_e) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi_e)^2 + \omega^2 \cdot m_{\varphi_e}^2 \quad (5) \\
 &\quad \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \varphi_e + \cos(\lambda - \lambda_e) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varphi_e)^2 + \omega^2 \cdot m_{\lambda_e}^2 \\
 &\quad \cdot \sin(\lambda - \lambda_e)^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi_e
 \end{aligned}$$

Використовуючи функціональні залежності (5), оцінено точність визначення горизонтальних рухів тектонічних плит із використанням отриманої моделі (рис. 3). Оскільки розташування перманентних ГНСС-станцій у межах тектонічних плит не є рівномірним, тож оцінювання точності виконано на основі регулярної сітки розміром 1° на 1° . Такий підхід дає змогу оцінити точність використання моделі рівномірно для всієї плити, навіть якщо там немає перманентних ГНСС-станцій.

Значна частина земної поверхні характеризується досить високою точністю визначення горизонтальних рухів – 0–6 мм. В основному на межі Тихоокеанської – Північноамериканської; Тихоокеанської – Кокос; Кокос – Антарктичної; Кокос – Південноамериканської; Індійської – Євразійської; Австралійської – Антарктичної – Тихоокеанської плит точність визначення горизонтальних рухів становить 6–12 мм, а в окремих місцях на межі Тихоокеанської – Північноамериканської та Індійської – Євразійської плит значення точності становлять 12–20 мм. Загалом можна стверджувати, що використання визначених сучасних ротаційних параметрів (див. табл. 1) забезпечить досить високу точність визначення горизонтальних рухів.

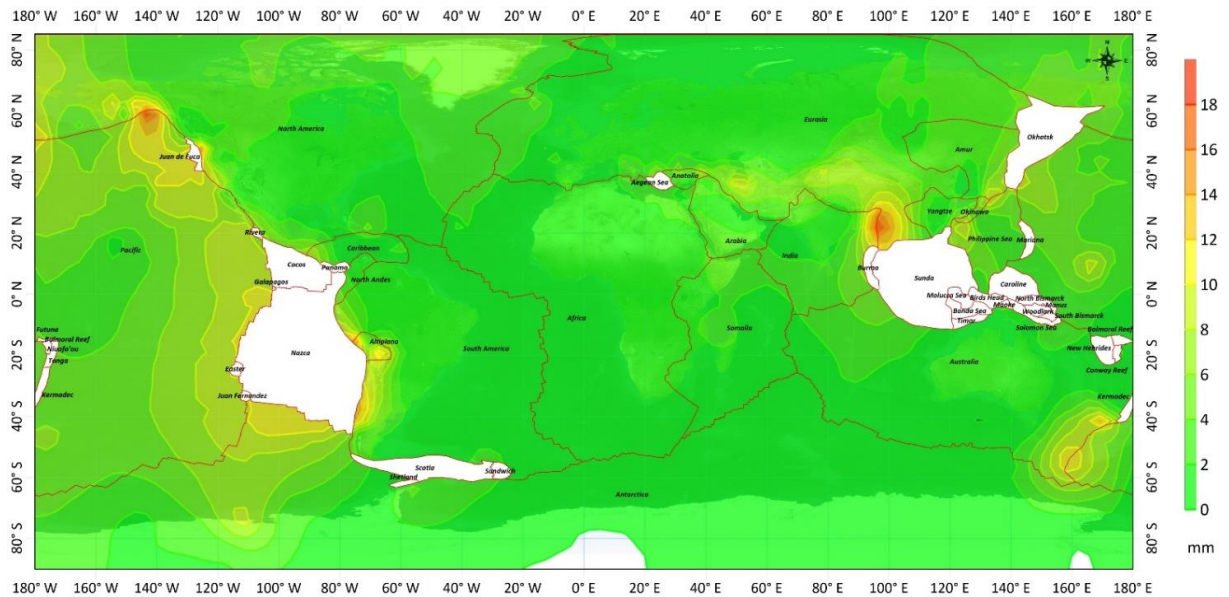


Рисунок 3. – Картосхема просторового розподілу поля точностей визначення горизонтальних рухів тектонічних плит із використанням визначених ротаційних параметрів на період 2002–2021 в системі координат ITRF2014/IGS2014

З метою оцінювання достовірності визначених сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит (див. табл. 1) зроблено порівняння отриманих значень з відомими моделями рухів тектонічних плит, а саме з геологічною моделлю NNR-MORVEL56 та з геодезичними моделями ITRF2000, ITRF2014 та ITRF2020. Встановлено, що отримані результати добре узгоджуються з відомими моделями, що підтверджує правильність обраного методу, а також достовірність отриманих результатів.

Ідентифіковані розбіжності між значеннями ротаційних параметрів різних моделей, очевидно, пов'язані з тим, що кожна модель побудована на основі даних, отриманих за різні проміжки часу. Через це цікавішим є порівняння точності визначення таких параметрів у різних моделях. У порівнянні із моделлю NNR-MORVEL56 точність визначення кутової швидкості є в середньому на 19% вищою. Точність визначення інших параметрів у цій моделі відсутня. У порівнянні із моделями ITRF2000 та ITRF2014 точність визначення ротаційних параметрів є в середньому на 70% та 11% вищою. У порівнянні із моделлю ITRF2020 точність визначення ротаційних параметрів у 7-ми із 12-ти порівнюваних тектонічних плит співпадає або є дещо вищою, на жаль, для решти 5 порівнюваних тектонічних плит точність визначення є нижчою.

Оскільки Антарктична тектонічна плита є єдиною, через яку проходить вісь її обертання, а також вісь обертання Землі, тому дослідження ротаційних параметрів цієї плити викликають значний науковий інтерес. З огляду на це, додатково виконано порівняння визначених ротаційних параметрів Антарктичної тектонічної плити з відомими науковими працями та моделями. Результати порівняння подано на рисунку 4.

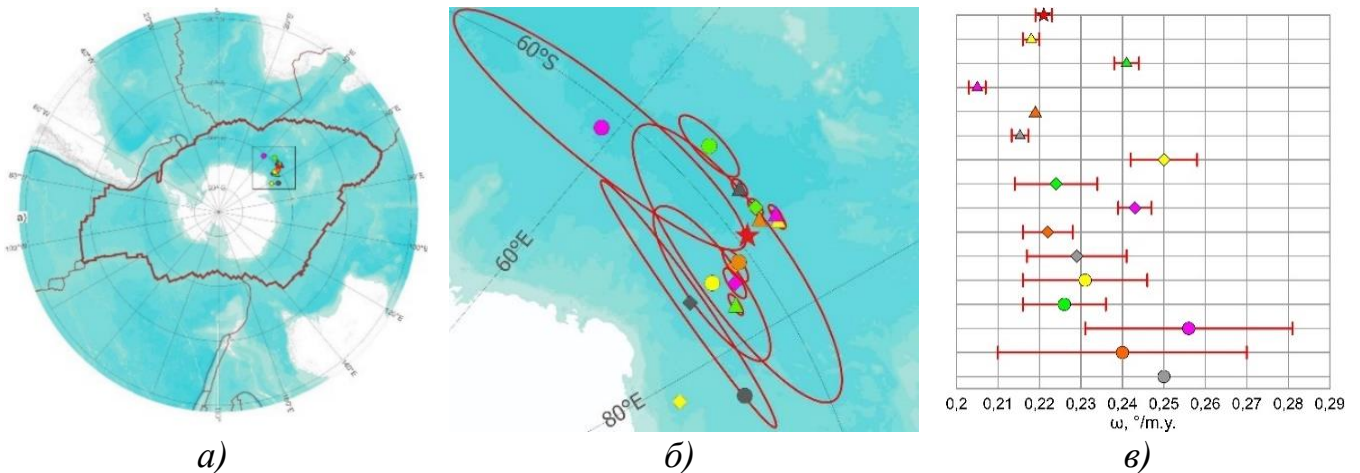


Рисунок 4 – Порівняння ротаційних параметрів Антарктичної тектонічної плити визначених в різних наукових працях та моделях (★ – ця робота, ▲ – Jagoda, 2021, ▲ – Tretyak et al., 2018, ▲ – Altamimi et al., 2017, ▲ – Ghavri et al., 2017, ▲ – Argus et al., 2011, ◆ – Jiang et al., 2009, ◆ – Drewes 2009, ◆ – Prawirodirdjo & Bock 2004, ◆ – Dietrich et al., 2004, ◆ – Boucher et al., 2004, ● – Altamimi et al., 2002, ● – Sella et al., 2002, ● – Dietrich et al., 2001, ● – Larson et al., 1997, ● – Argus & Gordon 1996)

Аналізуючи представлені результати (див. рис. 4), можна простежити, що визначені ротаційні параметри Антарктичної тектонічної плити добре узгоджуються з попередніми дослідженнями. Важливим є те, що отримані в даній роботі значення ротаційних параметрів Антарктичної тектонічної плити характеризуються найвищою точністю в порівнянні з попередніми роботами та моделями.

У третьому розділі «Розроблення методики визначення сучасних динамічних параметрів тектонічних плит для визначення динамічних параметрів тектонічних плит (моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичних енергій) пропонується використовувати часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій (рис. 5). Дана методика ґрунтується на твердженні, що будь-яке тверде тіло можна розглядати як систему з нескінченної кількості матеріальних точок, а момент інерції, момент імпульсу та кінетична енергія такого твердого тіла є сумою моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичних енергій цих матеріальних точок відповідно.

Для забезпечення можливості максимального відтворення дослідження в якості вхідних даних методика передбачає використання: вільно доступної глобальної моделі земної кори CRUST1.0; меж тектонічних плити Bird, 2010 у *.shp форматі; наявних у вільному доступі в НГЛ часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій або будь-яких інших даних, підготовлених в аналогічному форматі; наявних у вільному доступі в НГЛ географічних координат перманентних ГНСС-станцій; вимоги до часових рядів щоденних розв'язків і вимоги до визначених швидкостей перманентних ГНСС-станцій.

Вихідними даними в методиці є: визначені ротаційні параметри досліджуваних тектонічних плит; визначені значення моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичних енергій тектонічних плити.

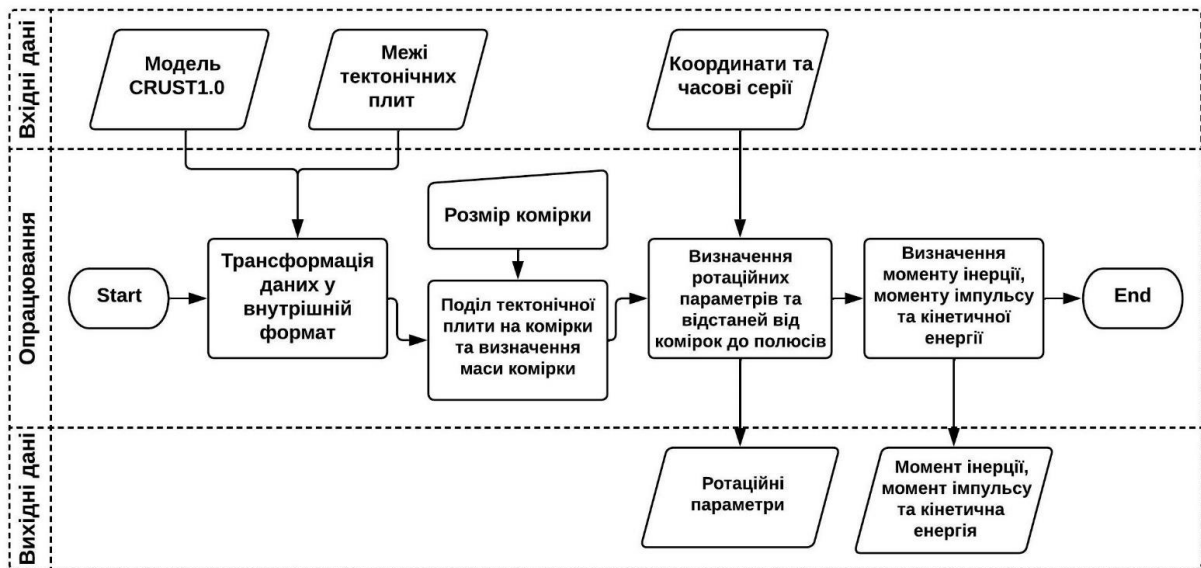


Рисунок 5 – Алгоритм визначення динамічних параметрів тектонічної плити на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій

Структурно запропонована методика передбачає 4 основних етапи (рис. 5):

1. Трансформація даних у внутрішній формат. Як уже описувалось у попередньому розділі, дані НГЛ структуровані окремим файлом для кожної перманентної ГНСС-станції й для зручності подальшого опрацювання потребують трансформування у внутрішній формат. Тому на даному етапі формується база даних, яка об'єднує часові ряди щоденних розв'язків із різних перманентних ГНСС-станцій.

Також на цьому етапі відбувається підготовка моделі земної кори CRUST1.0. Підготовка моделі земної кори CRUST1.0 до опрацювання передбачає її обрізку окремо для кожної досліджуваної тектонічної плити, використовуючи межі тектонічних плит. Тобто, вилучаються всі дані, які знаходяться за межами досліджуваної тектонічної плити.

2. Поділ тектонічної плити на комірки та визначення маси комірки. На даному етапі відбувається поділ всієї товщі тектонічної плити на окремі комірки.

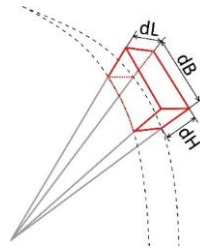


Рисунок 6. – Комірка в товщі тектонічної плити

Чим менший розмір комірки, тим точніше визначатимуться значення моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичної енергії, проте зменшення розмірів комірок збільшує час, необхідний на опрацювання. Тому в даній методиці використано комірки розміром $0.5^{\circ} \cdot 0.5^{\circ} \cdot 300$ м. Такий розмір забезпечує досить високу точність визначення при не надто тривалому процесі опрацювання.

Для зручності опрацювання поділ на комірки виконувався в геодезичних координатах (B, L, H) , натомість усе подальше опрацювання – в геоцентричних координатах (X, Y, Z) . Тому на даному етапі виконували трансформування координат вершин комірок з геодезичної системи координат (B_i, L_i, H_i) до геоцентричної системи координат (X_i, Y_i, Z_i) , використовуючи відомий перехід. Для кожної комірки визначали просторові координати її центру в геоцентричній системі координат $(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})$, а також маса m_i , яка є добутком об'єму V_i та густини ρ_i комірки, отриманої із моделі земної кори CRUST1.0. У випадку, якщо комірка потрапляє на межу шарів CRUST1.0 або на межу регулярної сітки моделі, її ділили на декілька окремих комірок меншого розміру.

3. Визначення ротаційних параметрів та відстані від комірки до полюсів. Для визначення ротаційних параметрів використовується математичний апарат, описаний у попередньому розділі, який ґрунтується на взаємозв'язку (2) між компонентами швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій та ротаційних параметрів тектонічної плити.

Після визначення ротаційних параметрів виконувався розрахунок найкоротшої відстані r_i (рис. 7) від осі обертання плити до центру кожної комірки в геоцентричній системі координат $(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})$. Вісь обертання проходить через два ротаційні полюси, визначені за правилом правої та лівої руки та переведені у геоцентричні координати (X_R, Y_R, Z_R) та (X_L, Y_L, Z_L) відповідно.

Найкоротшою відстанню є r_i , яка виходить із центру комірки та утворює прямий кут із віссю обертання. Для пошуку такої відстані використовувалась умова:

$$\frac{|(Z_L - X_R) \cdot (x_j - X_{c_i}) + (Z_L - X_R) \cdot (y_j - Y_{c_i}) + (Z_L - X_R) \cdot (z_j - Z_{c_i})|}{\sqrt{(X_L - X_R)^2 + (Y_L - X_R)^2 + (Z_L - X_R)^2} \cdot \sqrt{(x_j - X_{c_i})^2 + (y_j - Y_{c_i})^2 + (z_j - Z_{c_i})^2}} = 0 \quad (6)$$

де, (x_j, y_j, z_j) – довільна точка на осі обертання плити.

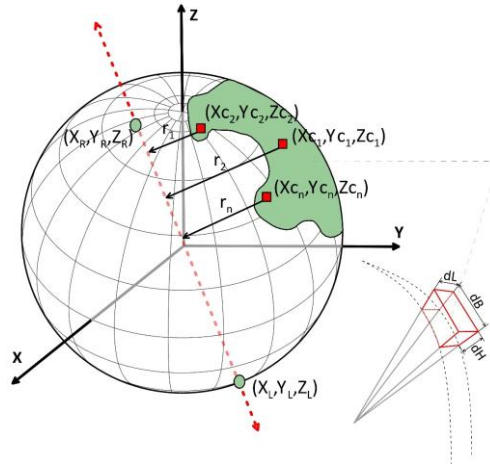


Рисунок 7 – Відстань від центру комірки до осі обертання плити

4. Визначення моменту інерції, моменту імпульсу та кінетичної енергії тектонічних плит. Для визначення цих параметрів використано такі функціональні залежності:

$$I_P = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad L_P = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \cdot \omega_P = I_P \cdot \omega_P, \quad (7)$$

$$E_{KP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \cdot \omega_P^2}{2} = \frac{I_P \cdot \omega_P^2}{2}$$

де, n – кількість матеріальних точок, з яких складається тектонічна плита, m_i – маса матеріальної точки, r_i – відстань до матеріальної точки, ω_p – кутова швидкість обертання тектонічної плити.

Використовуючи запропоновану методику, а також значення сучасних ротаційних параметрів (табл. 1), встановлених у попередньому розділі, визначено сучасні значення моментів інерції, моментів імпульсу, а також кінетичні енергії основних тектонічних плит. Отримані значення є досить не однорідними, тому для спрощення їх аналізу побудовано порівняльні графіки (рис. 8). Аналіз побудованих графіків виконано окремо для кожного параметра.

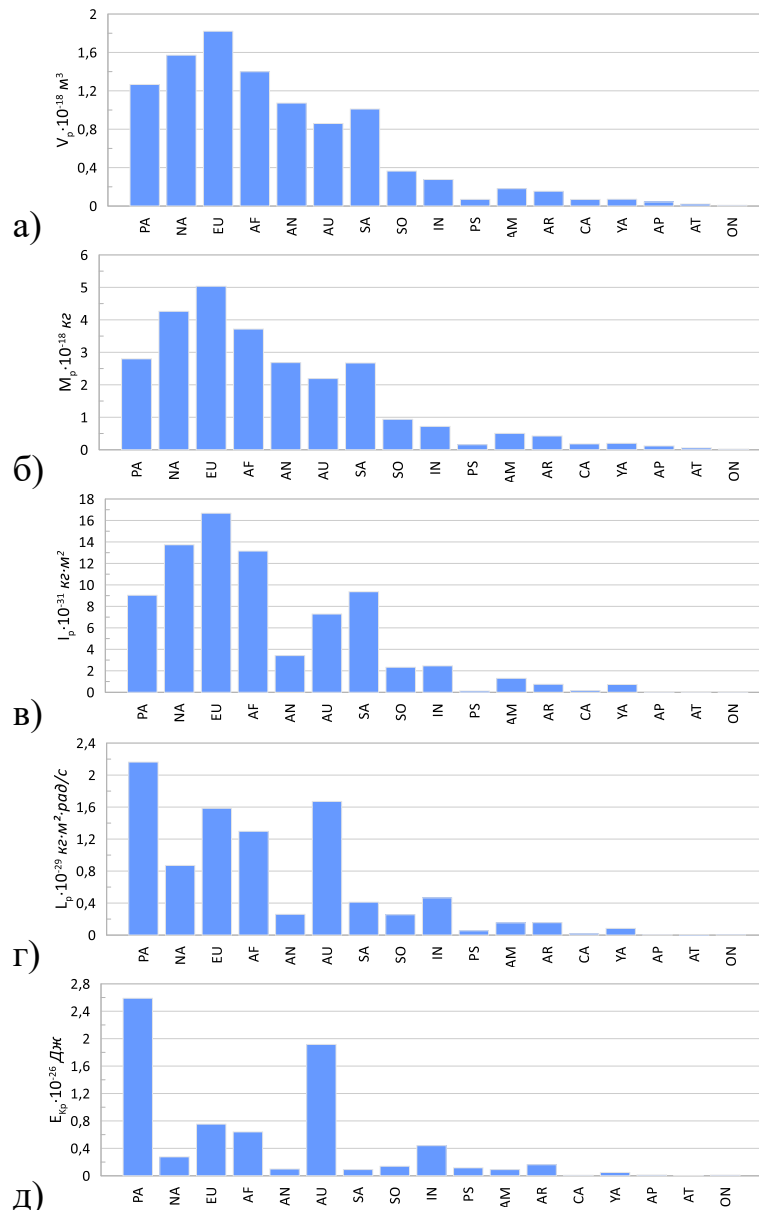


Рисунок 8. – Порівняння сучасних значень об'ємів (а), мас (б), моментів інерції (в), моментів імпульсу (г), а також кінетичних енергій (д) основних тектонічних плит

Об'єми основних тектонічних плит (рис. 8а) змінюються від $7.53 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$ для Окінавської плити до $1.82 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ для Євразійської плити. Незважаючи на те, що Тихоокеанська плита є найбільшою за площею, її об'єм є меншим від Євразійської, Північноамериканської та Африканської плит, очевидно, це зумовлено товщиною цієї тектонічної

плити. Товщина Тихоокеанської тектонічної плити через розташування її переважної частини під товщею океану є значно меншою від плит, які охоплюють значні частини суші.

Маси основних тектонічних плит (рис. 8б) змінюються від $2.02 \cdot 10^{16}$ кг для Окінавської плити до $5.03 \cdot 10^{18}$ кг для Євразійської плити. Отримані значення маси тектонічних плит безпосередньо узгоджуються з визначеними значеннями їх об'єму, що пов'язано із функціональним зв'язком між цими величинами через густину.

Моменти інерції основних тектонічних плит (рис. 8в) змінюються від $3.50 \cdot 10^{28}$ кг·м² для Анатолійської плити до $1.67 \cdot 10^{32}$ кг·м² для Євразійської плити. Точність визначення моменту інерції становить не більше 4% від значення моменту інерції тектонічної плити. Найнижча точність визначення моменту інерції ідентифікована для Окінавської тектонічної плити ($9.54 \cdot 10^{27}$ кг·м² або 3,72%). Моменти інерції основних тектонічних плит доволі добре узгоджуються з визначеними значеннями їх об'єму та маси. Момент інерції Антарктичної тектонічної плити ($3.42 \cdot 10^{31}$ кг·м²) є досить малим у розрізі площі, маси та об'єму цієї плити серед інших. Таке значення моменту інерції плити безпосередньо пов'язано з тим, що Антарктична тектонічна плита є єдиною, через яку проходить вісь її обертання. Тому, очевидно, основна маса цієї тектонічної плити сконцентрована в її центральній частині.

Моменти імпульсу основних тектонічних плит (рис. 8г) змінюються від $1.71 \cdot 10^{26}$ кг·м²·рад/с для Анатолійської плити до $2.16 \cdot 10^{29}$ кг·м²·рад/с для Тихоокеанської плити. Точність визначення моменту імпульсу становить не більше 4,5% від значення моменту імпульсу тектонічної плити. Найнижчою точністю визначення моменту імпульсу характеризується Окінавська тектонічна плита ($7.64 \cdot 10^{24}$ кг·м²·рад/с або 4,17%). Найбільшими моментами імпульсу характеризуються Тихоокеанська, Австралійська, Євразійська та Африканська тектонічні плити, тобто, ці плити генерують найбільшу кількість руху, який обертається навколо певної осі. Через доволі малу кутову швидкість (табл. 1) Північноамериканська та Південноамериканська тектонічні плити генерують значно меншу кількість руху, незважаючи на великі значення моментів інерції.

Кінетичні енергії основних тектонічних плит (рис. 8д) змінюються від $4.19 \cdot 10^{23}$ Дж для Анатолійської плити до $2.59 \cdot 10^{26}$ Дж для Тихоокеанської плити. Точність визначення кінетичної енергії становить не більше 5,5% від значення кінетичної енергії тектонічної плити. Найнижчою точністю визначення кінетичної енергії характеризується Окінавська тектонічна плита ($1.93 \cdot 10^{22}$ Дж або 5,3%). Цікавим є те, що кінетична енергія Тихоокеанської та Австралійської плит є значно більшою за кінетичну енергію інших плит, а сума їх кінетичних енергій є приблизно в два рази більшою за суму кінетичних енергій усіх інших тектонічних плит. Тобто, можна припустити, що ці дві тектонічні плити фактично задають динаміку всіх сучасних рухів основних тектонічних плит. Взаємозв'язок системи Тихоокеанської та Австралійської плит, а також їх рушійну роль в тектонічних рухах упродовж останніх 42 мільйонів років також описано в науковій літературі. Такі висновки автори зробили на основі аналізу моментів імпульсу, визначених із динаміки швидкості поширення магнітних аномалій. Моменти імпульсу інших тектонічних плит також добре узгоджуються з нашими результатами.

У четвертому розділі «Просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між розподілом параметрів основних тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі» здійснено апробацію удосконалених та розроблених у другому та третьому розділах

методик для визначення середньорічних значень ротаційних параметрів, моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичних енергій тектонічних плит на основі часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій за період 2002–2021 років. Такі визначення проведено тільки для великих тектонічних плит (Тихоокеанської, Північноамериканської, Євразійської, Африканської, Антарктичної, Австралійської та Південноамериканської), оскільки вони мають більш-менш однорідну, та головне, достатню кількість даних для всіх років упродовж досліджуваного періоду. Також через достатню кількість даних точність визначення всіх досліджуваних параметрів для великих тектонічних плит є значно вищою. Отримані параметри можна використати для оцінювання можливого взаємозв'язку між динамікою великих тектонічних плит і нерівномірністю обертання Землі.

Аналізуючи значення середньорічних сучасних ротаційних параметрів великих тектонічних плит за період 2002–2021 років, можна стверджувати, що точність визначення середньорічних координат ротаційних полюсів є нижчою (приблизно в 2–5 разів) у порівнянні з точністю визначення абсолютних значень координат ротаційних полюсів за період 2002–2021 років (табл. 1). Така точність безпосередньо залежить від якості даних для кожного року. Підтверджено наявність міграції ротаційних полюсів великих тектонічних плит, оскільки значення зміни значно перевищують точність їх визначення. Найбільш динамічними є зміни координат ротаційних полюсів Південноамериканської, Північноамериканської, Антарктичної та Євразійської тектонічних плит (в межах 0° – 45°), натомість найнижчою динамікою характеризується зміна координат ротаційного полюса Австралійської тектонічної плити (в межах 0° – 5°). На основі проведеного кореляційного аналізу, побудуємо діаграму взаємозв'язків між змінами середньорічних координат ротаційних полюсів великих тектонічних плит (рис. 9).

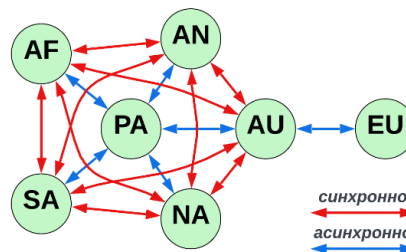


Рисунок 9 – Діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних координат ротаційних полюсів великих тектонічних плит

Аналізуючи представлену діаграму (див. рис. 9), робимо висновки, що зміна середньорічних координат ротаційних полюсів Північноамериканської, Африканської, Антарктичної, Південноамериканської та Австралійської тектонічних плит відбувається синхронно, натомість їх зміна є асинхронною до зміни Тихоокеанської тектонічної плити. Також асинхронними є зміни координат ротаційних полюсів Австралійської та Євразійської тектонічних плит.

Вікове уповільнення швидкості обертання Землі (через припливне тертя в тілі Землі й океанах) є причиною руху тектонічних плит. Зміни LOD (Length of Day) призводять до горизонтальних зсувних напружень, які у взаємодії з нерівномірним обертаним рухом Землі є домінуючим чинником впливу на геодинамічні процеси Землі та їх прояву в сейсмічній і вулканічній активності. Тому в рамках аналізу динаміки

зміни середньорічних значень кутової швидкості великих тектонічних плит вирішено оцінити можливий взаємозв'язок такої динаміки з нерівномірністю обертання Землі.

Вхідними даними для обчислення ротаційних параметрів Землі служили значення зміни LOD, які знаходяться у вільному доступі на сайті Міжнародної служби обертання Землі. Зміна значень LOD – це різниця величин періодів $P_{Ed} - P_{Ad}$, де P_{Ed} – період земної доби, а P_{Ad} – період астрономічної доби (86400 секунд). На основі значень зміни LOD визначено середньорічну кутову швидкість обертання Землі:

$$\omega_{\oplus} = \Omega_N \cdot \left(1 - \frac{LOD}{T}\right) \quad (8)$$

де, Ω_N – номінальна швидкість обертання Землі (відповідає швидкості обертання середньої епохи 1820 р), яка рівна $72921151.467064 \cdot 10^{-12}$ рад/с, T – тривалість середньої сонячної доби 86400 секунд в системі атомного часу ТАІ.

Використовуючи функціональну залежність (8) обчислено середньорічні значення кутової швидкості обертання Землі впродовж 2002–2021 років. Зауважимо, що для отримання середньорічних значень кутової швидкості обертання Землі було використано середньорічні значення LOD.

Підтверджено, що кутова швидкість обертання Землі та кутові швидкості великих тектонічних плит є динамічними параметрами. Найбільшою динамікою зміни кутовою швидкості характеризуються Антарктична, Південноамериканська та Північноамериканська тектонічні плити. Можна зауважити стрімке систематичне збільшення кутової швидкості обертання Землі після 2016 року, проте кутові швидкості великих тектонічних плит не мають настільки різких змін. На основі проведеного кореляційного аналізу побудуємо діаграму взаємозв'язків між змінами середньорічних значень кутової швидкості обертання великих тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі (рис. 10).

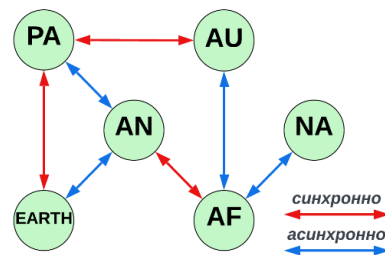


Рисунок 10 – Діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних значень кутової швидкості обертання великих тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі

Аналізуючи представлену діаграму (див. рис. 10), можна зробити висновки, що кутова швидкість обертання Землі змінюється синхронно з кутовою швидкістю Тихоокеанської тектонічної плити та асинхронно з кутовою швидкістю Антарктичної тектонічної плити. Тобто, збільшення кутової швидкості обертання Землі сповільнює рух Антарктичної тектонічної плити, яка рухається в протилежний бік до напрямку обертання Землі, та прискорює рух Тихоокеанської тектонічної плити, яка рухається в напрямку обертання Землі. Оскільки маси тектонічних плит є незмінними, то зміна середньорічних значень моментів інерції спричинена збільшенням та/або зменшенням віддалей до полюсів обертання, тобто зміною координат полюсів обертання. У зв'язку з цим можна стверджувати, що найбільший вплив на зміну моменту інерції тектонічної

плити має зміна довготи полюсу обертання. Зміна широти полюсу обертання також впливає на зміну моменту інерції тектонічної плити, але цей вплив є незначним.

Найактивнішими змінами середньорічних значень моментів інерції характеризуються Південноамериканська, Північноамериканська, Євразійська та Антарктична тектонічні плити, зміна значень решти великих тектонічних плит є значно меншими. Взаємозв'язок між змінами середньорічних значень моментів інерції великих тектонічних плит представимо на рисунку 11.

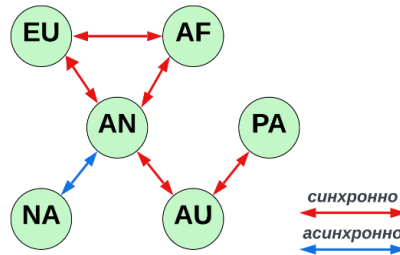


Рисунок 11 – Діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних значень моментів інерції великих тектонічних плит

Аналізуючи представлену діаграму (див. рис. 11) можна зробити висновки, що інертність Євразійської, Антарктичної та Африканської тектонічних плит змінюється синхронно. Також синхронно змінюється інертність Антарктичної та Австралійської і Австралійської та Тихоокеанської тектонічних плит. Натомість інертність Антарктичної та Північноамериканської тектонічних плит змінюється асинхронно.

Відомо, що нерівномірність обертання Землі призводить до перерозподілу моменту імпульсу між різними оболонками Землі; прояву силових напружень між земним ядром і мантією; порушення ізостатичної та постгляціальної рівноваги, а також може бути спусковим механізмом вивільнення накопиченої енергії в земній корі й збудженні сейсмічної та вулканічної активності. Відповідно до закону збереження імпульсу момент імпульсу Землі є сталою величиною. Проте положення осі обертання Землі та її швидкість обертання постійно змінюється, тому в даному дослідженні ми оперували поняттям умовного моменту імпульсу Землі, який враховує тільки зміну кутової швидкості обертання Землі. Для визначення умовного моменту імпульсу Землі використовували наступну функціональну залежність:

$$L_E = I_E \cdot \omega_{\oplus} \quad (9)$$

де, I_E – момент інерції Землі, який рівний $9.723 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, ω_{\oplus} – кутова швидкість обертання Землі обчислена з використанням залежності (8).

Використовуючи методику, описану в третьому розділі, виконано обчислення середньорічних значень моментів імпульсу великих тектонічних плит за період 2002–2021 років. Слід зауважити, що значення умовного моменту імпульсу Землі є на 4–5 порядків більшими за значення моментів імпульсу великих тектонічних плит. Така різниця пов'язана із тим, що момент імпульсу Землі, крім моментів імпульсу тектонічних плит, включає моменти імпульсу багатьох інших оболонок (ядро, мантія, атмосфера, гідросфера, тощо). Також чітко ідентифікується стрімке систематичне збільшення умовного моменту імпульсу Землі після 2016 року, що безпосередньо пов'язано зі збільшенням кутової швидкості обертання Землі. Проте щорічна зміна

умовного моменту імпульсу Землі є на 6 порядків меншою за зміну моментів імпульсу будь-якої з великих тектонічних плит. У порівнянні з динамікою моментів імпульсу великих тектонічних плит можна вважати, що умовний момент імпульсу Землі є сталим, це є додатковим підтвердженням дії закону збереження енергії, а саме: збереження імпульсу. Тобто, зміни моментів імпульсу великих тектонічних плит компенсують одна одну для збереження моменту імпульсу Землі сталим. Додатково ця зміна компенсується рухами ядра, мантії, інших тектонічних плит, океану, атмосфери та багатьох інших чинників.

Найактивнішими змінами середньорічних значень моментів імпульсу характеризуються Південноамериканська, Північноамериканська, Євразійська та Антарктична тектонічні плити, зміна значень решти великих тектонічних плит є значно меншими. Взаємозв'язок між змінами середньорічних значень моментів імпульсу великих тектонічних плит представимо на рисунку 12.

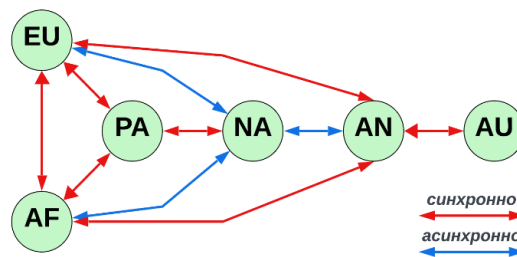


Рисунок 12 – Діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних значень моментів імпульсу великих тектонічних плит

Аналізуючи представлену діаграму (див. рис. 12), можемо зробити висновки, що моменти імпульсу Євразійської, Африканської, Тихоокеанської та Антарктичної тектонічних плит змінюються синхронно, натомість, їх зміна є асинхронною до зміни моменту імпульсу Північноамериканської тектонічної плити.

Як зазначали раніше, кінетична енергія є фізичною величиною, для якої також діє фундаментальний закон збереження, а саме: закон збереження енергії. Тобто, повна енергія замкненої системи, якою є Земля, зберігається сталою впродовж часу. Проте положення осі обертання Землі та її швидкість обертання постійно змінюється. Тому очевидно, що зміна цих параметрів компенсує одна одну для збереження кінетичної енергії Землі сталою. Оскільки кінетична енергія Землі є сталою величиною, то в даному дослідженні ми оперуємо поняттям умовної кінетичної енергії Землі, яка враховує тільки зміну кутової швидкості обертання Землі, для обчислення якої застосовували наступну функціональну залежність:

$$E_{KE} = \frac{I_E \cdot \omega_{\oplus}^2}{2} \quad (10)$$

де, I_E – момент інерції Землі, який рівний $9.723 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, ω_{\oplus} – кутова швидкість обертання Землі обчислена з використанням залежності (8).

Використовуючи методику, описану в третьому розділі, виконано обчислення середньорічних значень кінетичної енергії великих тектонічних плит за період 2002–2021 років. Найактивнішими змінами середньорічних значень кінетичної енергії характеризуються Австралійська, Євразійська, Північноамериканська та

Південноамериканська тектонічні плити, зміна значень решти великих тектонічних плит є значно меншими. На рисунку 13 представлено діаграму взаємозв'язків між змінами середньорічних значень кінетичної енергії великих тектонічних плит.

Аналізуючи представлену діаграму (див. рис. 13), можна зробити висновки, що кінетична енергія Африканської, Євразійської, Антарктичної, Австралійської та Тихоокеанської тектонічних плит змінюється синхронно. Натомість, зміна кінетичної енергії Північноамериканської тектонічної плити є асинхронною до зміни кінетичної енергії Євразійської та Південноамериканської тектонічних плит.

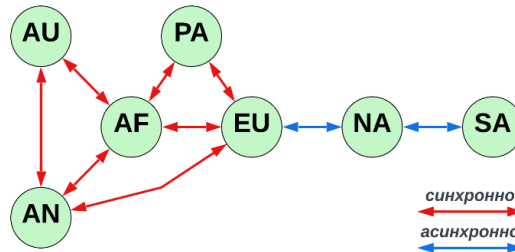


Рисунок 13. – Діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних значень кінетичної енергії великих тектонічних плит

У п'ятому розділі «Удосконалення методики визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань» використовуючи процедури, засновані на методі найменших квадратів та тензорному аналізі, запропоновано удосконалену методику визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань (рис. 14).

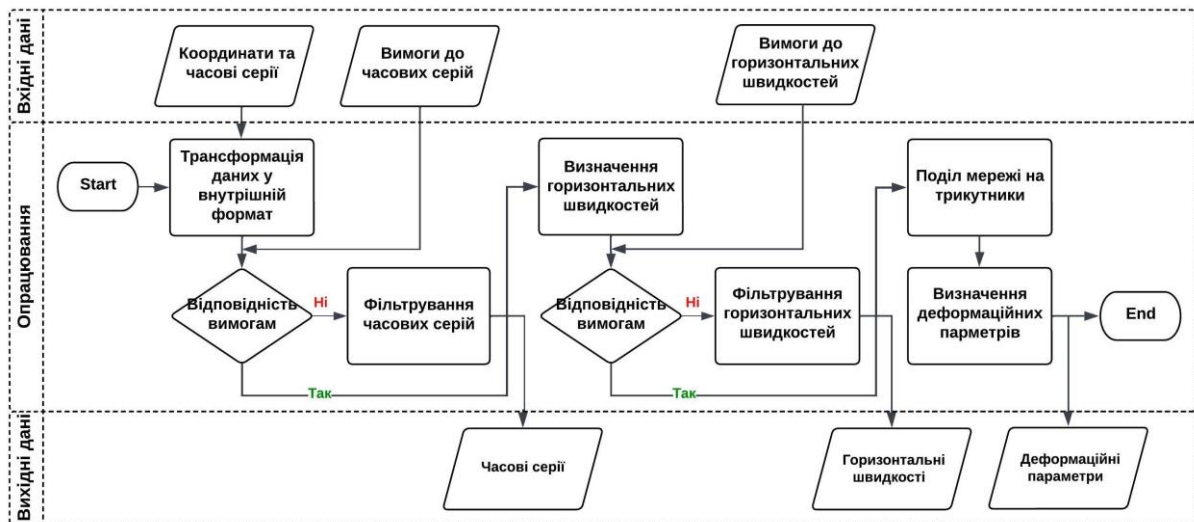


Рисунок 14 – Алгоритм визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань

У ролі вхідних даних удосконалена методика передбачає використання: наявних у вільному доступі в НГЛ часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій або будь-яких інших даних, підготовлених в аналогічному форматі; наявних у вільному доступі в НГЛ географічних координат перманентних ГНСС-станцій або географічних координат будь-яких інших пунктів, підготовлених в аналогічному

форматі; вимог до часових рядів щоденних розв'язків і вимог до визначених швидкостей перманентних ГНСС-станцій.

Вихідними даними для удосконаленої методики є: опрацьовані (фільтровані) часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій; визначені швидкості перманентних ГНСС-станцій; визначені деформаційні параметри.

Важливо підкреслити, що координати та часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій доступні на НГЛ у системі IGS14, проте в даній методиці можна також використовувати дані ГНСС-спостережень у будь-якій іншій системі координат.

Структурно запропонована методика передбачає 6 основних етапів:

1. Трансформація даних у внутрішній формат. Аналогічно із методиками, описаними у другому та третьому розділах, на даному етапі виконується формування бази даних, яка об'єднує часові ряди щоденних розв'язків із різних перманентних ГНСС-станцій.

2. Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація часових рядів. Відбір даних перманентних ГНСС-станцій відбувається на основі критеріїв до перманентних ГНСС-станцій, наведених у Altamimi et. al., 2017. Часові ряди перманентних ГНСС-станцій, які мали одиночні грубі похибки та викиди, фільтрували та не включали до опрацювання. Виявлення та видалення викидів і грубих помилок у часових рядах щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій виконували із використанням порогу 3σ .

3. Визначення швидкостей горизонтальних зміщень. На деформаційні процеси земної поверхні впливає надзвичайно багато чинників, тому під час визначення швидкостей горизонтальних зміщень для аналізу таких процесів не достатньо використовувати лінійне рівняння виду (1), яке враховує тільки лінійну (трендову) складову руху. Відтак на даному етапі використовували складнішу модель, яка додатково враховує сезонність рухів:

$$f(t_i) = y_0 + v(t_i) + \sum_{f=1}^2 [c_f \cdot \sin(2\pi f t_i) + d_f \cdot \cos(2\pi f t_i)] + \varepsilon_y(t_i), \quad (11)$$

де, t_i – епоха спостереження, v – лінійна швидкість перманентної ГНСС-станції, y_0 – зсув часового ряду на початкову епоху, $\varepsilon_y(t_i)$ – шум, c_f та d_f – параметри періодичного руху, $f = 1$ або $f = 2$ – для річного та піврічного періоду відповідно.

Системи рівнянь, складені на основі функціональної залежності (11), розв'язували окремо для кожної компоненти методом найменших квадратів, визначали складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій, а також виконували оцінку точності визначених параметрів.

4. Перевірка на відповідність вимогам та фільтрація визначених швидкостей. На цій стадії визначали та відбраковували перманентні ГНСС-станції з низькою точністю визначення складових швидкостей горизонтальних зміщень, а також перманентні ГНСС-станції з аномальними напрямками векторів. Швидкості, точність визначення яких була гіршою за 15% від значення швидкості, вилучали із опрацювання.

5. Поділ мережі ГНСС-станцій на трикутники за алгоритмом Делоне. Відомо, що деформаційні параметри земної поверхні характеризують певну площину, тому їх доцільно обчислювати для центрів елементарних фігур, на які цю площину розділено. Найпростішим, а відповідно і найпопулярнішим методом, є поділ площини на трикутники за алгоритмом Делоне (триангуляція Делоне), тому на цьому етапі

удосконаленої методики мережу перманентних ГНСС-станцій розбивали на мережу трикутників з вершинами в цих станціях.

б. Визначення деформаційних параметрів. У даній роботі виконували дослідження тільки планових деформацій, тому на деформаційні процеси накладали три основні умови: а) визначаються плоскі деформації в горизонтальній площині; б) нехтування вертикальними рухами не впливає на деформаційні процеси; в) деформації рівномірно розподілені в межах трикутника.

Для визначення деформаційних процесів використовувався тензорний аналіз, а всі обчислення проводили окремо для кожного, визначеного на попередньому етапі, трикутника. Розглянемо визначення деформаційних параметрів на прикладі трикутника з вершинами $1(x_1, y_1)$, $2(x_2, y_2)$ та $3(x_3, y_3)$, а також визначеними швидкостями горизонтальних рухів (v_{x_1}, v_{y_1}) , (v_{x_2}, v_{y_2}) та (v_{x_3}, v_{y_3}) (рис. 15).

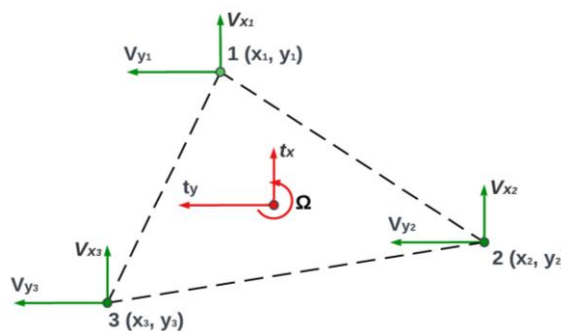


Рисунок 15.– Схема деформацій у межах одного трикутника

Відомо, що деформаційні процеси є сумою деформацій зсуву, деформацій повороту, а також деформацій форми. Під деформаціями зсуву розуміють паралельне переміщення всього трикутника відносно початкової системи (t_x, t_y) . Деформації повороту характеризують кутову швидкість повороту трикутника відносно центру його мас Ω . Деформації форми характеризують зміну форми трикутника, яку можна представити елементами двовимірного тензора деформацій $(\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy})$.

Взаємозв'язок між швидкостями горизонтальних рухів та деформаційними процесами можна представити у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 v_{x_1} &= (x_1 \epsilon_{xx}) + (y_1 \epsilon_{xy}) - (y_1 \Omega) + (t_x) \\
 v_{y_1} &= (x_1 \epsilon_{xy}) + (x_1 \Omega) + (y_1 \epsilon_{yy}) + (t_y) \\
 v_{x_2} &= (x_2 \epsilon_{xx}) + (y_2 \epsilon_{xy}) - (y_2 \Omega) + (t_x) \\
 v_{y_2} &= (x_2 \epsilon_{xy}) + (x_2 \Omega) + (y_2 \epsilon_{yy}) + (t_y) \\
 v_{x_3} &= (x_3 \epsilon_{xx}) + (y_3 \epsilon_{xy}) - (y_3 \Omega) + (t_x) \\
 v_{y_3} &= (x_3 \epsilon_{xy}) + (x_3 \Omega) + (y_3 \epsilon_{yy}) + (t_y)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Систему рівнянь (12) можна розв'язати методом найменших квадратів, оскільки невідомих менше ніж кількість рівнянь. Значення отримані в результаті розв'язання системи рівнянь (12) використовували для визначення деформаційних параметрів: значення та напрямку осей деформацій, загального зсуву та дилатації.

Апробацію запропонованої методики проведено на прикладі дослідження деформаційних процесів Антарктичної тектонічної плити та Африканської системи

тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань.

Вхідними даними для досліджень деформаційних процесів Антарктичної тектонічної плити служили координати та часові ряди щоденних (24-годинних) розв'язків перманентних ГНСС-станцій у форматі *.tenv3 в системі координат IGS14, наявних у вільному доступі в НГЛ. В результаті відібрано 59-ть перманентних ГНСС-станцій з використанням критеріїв, детальний опис яких представлено в другому розділі.

Додатково до опрацювання включено перманентну ГНСС-станцію ASAV (Antarctic Station Academic Vernadsky) ($65^{\circ}14'44''S$, $64^{\circ}15'26''W$), інстальовану автором у рамках 24-ї Української сезонної антарктичної експедиції (січень-квітень 2019р.) поблизу Української антарктичної станції «Академік Вернадський». Інстальована ГНСС-станція ASAV обладнана ГНСС-приймачем Novatel PwrPak7 та ГНСС-антенною Novatel Nov702GG.

Опрацювання результатів вимірювань перманентної ГНСС-станції ASAV проведено автором з використанням ліцензованого програмного комплексу Bernese GNSS Software v5.2. Для отримання часових рядів щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції ASAV використано модуль Bernese Processing Engine (BPE) та стратегію опрацювання RINEX-TO-SINEX (RNX2SNX). RNX2SNX – це стандартне опрацювання, засноване на аналізі подвійних різниць із статичних двочастотних вимірювань. Основною метою даної стратегії є отримання точних координат для вибраних станцій у заданій системі координат.

Зазначимо, що ITRF2014 використано в якості вихідної системи координат для опрацювання. Оскільки, як вказувалося раніше, вона ідентична до IGS14, у якій завантажені часові ряди щоденних розв'язків інших перманентних ГНСС-станцій. Опрацювання щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції ASAV виконано відносно 6 перманентних ГНСС-станцій мережі IGS. На рисунку 16 наведено часовий ряд щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції ASAV.

Аналізуючи представлений часовий ряд, варто звернути увагу на наявність сезонних змін, які успішно ідентифікуються з використанням функціональної залежності (11). Зазначимо, що для врахування річних та піврічних змін у функціональній залежності (11) ми використовували періоди 365.25 та 182.63 доби відповідно.

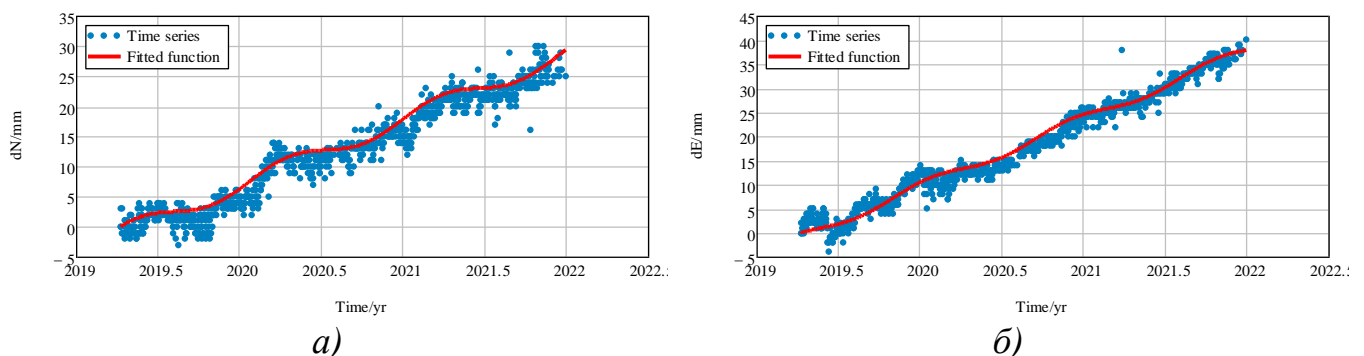
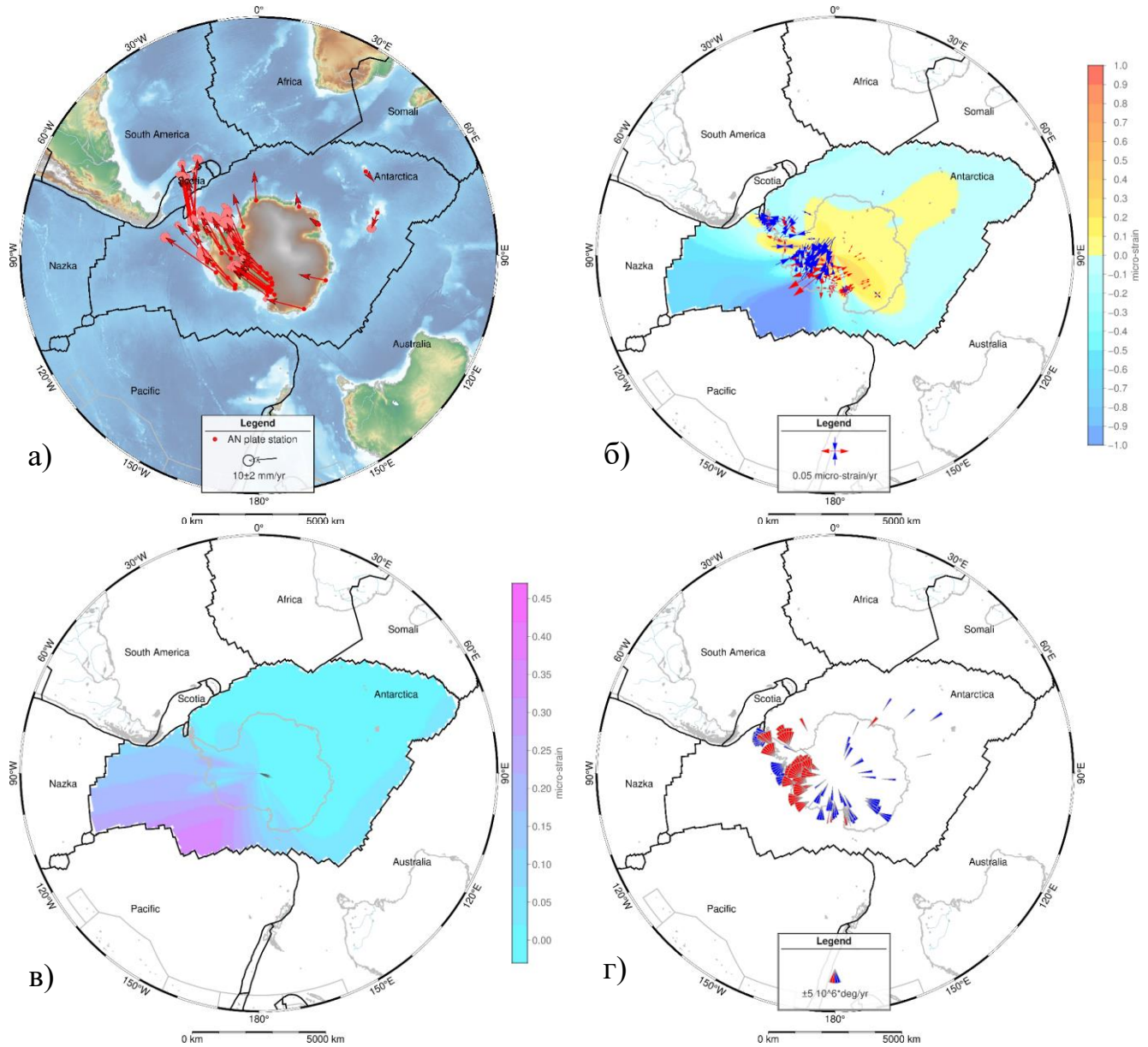


Рисунок 16 – Часовий ряд щоденних розв'язків перманентної ГНСС-станції ASAV

Спираючись на отримані щоденні розв'язки, визначено компоненти вектора швидкості зміщень перманентної ГНСС-станції ASAV: $V_n = 10.83 \pm 0.10$ мм/рік, $V_e = 13.43 \pm 0.09$ мм/рік, $V_u = 5.39 \pm 0.29$ мм/рік.

Відповідно до запропонованої методики на основі підготовлених даних виконано визначення швидкостей горизонтальних зміщень відібраних перманентних ГНСС-станцій Антарктичної тектонічної плити з використанням функціональної залежності (11). Також проведено визначення швидкостей дилатації та осей деформацій, швидкостей загального зсуву та швидкостей обертання Антарктичної тектонічної плити (рис. 17).



а) сунок 17 – Просторовий розподіл поля а) горизонтальних швидкостей, б) швидкостей дилатації та осей деформацій, в) швидкостей загального зсуву та г) швидкостей обертання Антарктичної тектонічної плити

Просторовий розподіл поля швидкостей горизонтальних деформацій та дилатації, загального зсуву є досить не однорідний в межах Антарктичної тектонічної плити. Спостерігається поступове зменшення потужності деформаційних процесів із заходу на схід, у напрямку Західна Антарктида – Трансантарктичний гірський масив – Східна Антарктида. Отриманні результати є додатковим підтвердженням, того, що Західна Антарктида зазнає більших деформацій, ніж Східна Антарктида, яка в тектонічному сенсі є стабільним регіоном.

Вхідними даними для досліджень деформаційних процесів Африканської системи тектонічних плит слугували координати й часові ряди щоденних (24-годинних) розв'язків перманентних ГНСС-станцій у форматі *.tenv3 в системі координат IGS14, наявних у вільному доступі в НГЛ. Зазначимо, що було проаналізовано всі доступні дані, починаючи з 1996 року для Африканської та Аравійської плит і з 2001 року для Сомалійської. Загалом для дослідження було відібрано 217 перманентних ГНСС-станцій (126 для Африканської плити, 49 для Сомалійської і 36 для Аравійської).

Відповідно до запропонованої методики на основі підготовлених даних виконано визначення швидкостей горизонтальних зміщень відібраних перманентних ГНСС-станцій Африканської системи тектонічних плит з використанням функціональної залежності (11). Також проведено визначення швидкостей дилатації та осей деформацій, швидкостей загального зсуву та швидкостей обертання Африканської системи тектонічних плит (рис. 18).

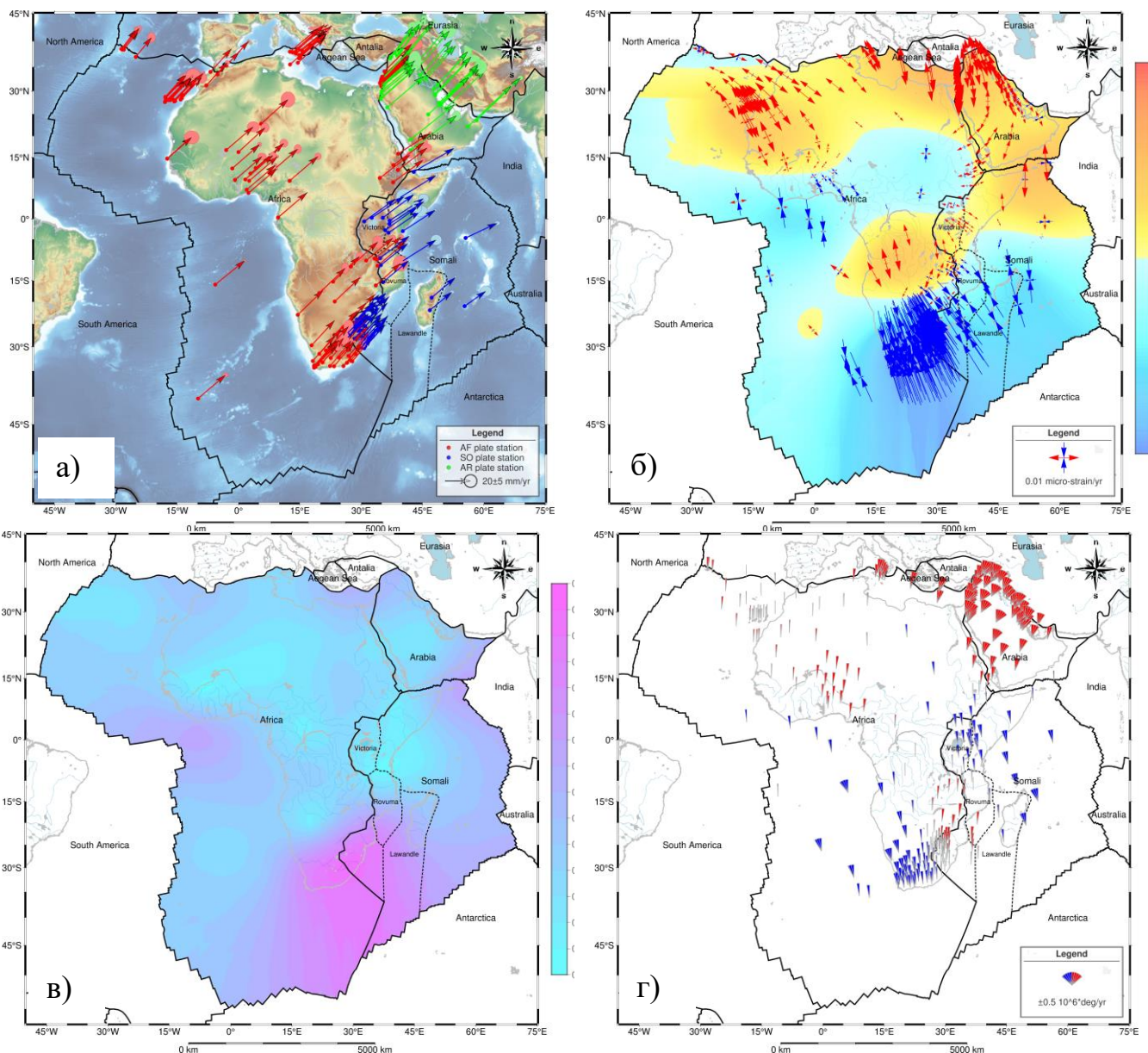


Рисунок 18 – Просторовий розподіл поля а) горизонтальних швидкостей, б) швидкостей дилатації та осей деформацій, в) швидкостей загального зсуву та г) швидкостей обертання Антарктичної тектонічної плити

Наведені рисунки (див. рис. 18) підтверджують наявність дивергентних процесів на межі Африканської – Аравійської плит, Аравійської – Сомалійської плит та Африканської – Сомалійської плит, яка відома як Східноафриканська рифтова система й простягається від Червоного моря на півночі до Мозамбіку на півдні. Для більш детальної візуалізації та аналізу цих процесів було окремо визначено осі деформацій та напрямки деформацій для характерних точок цих трьох границь тектонічних плит (рис. 19).

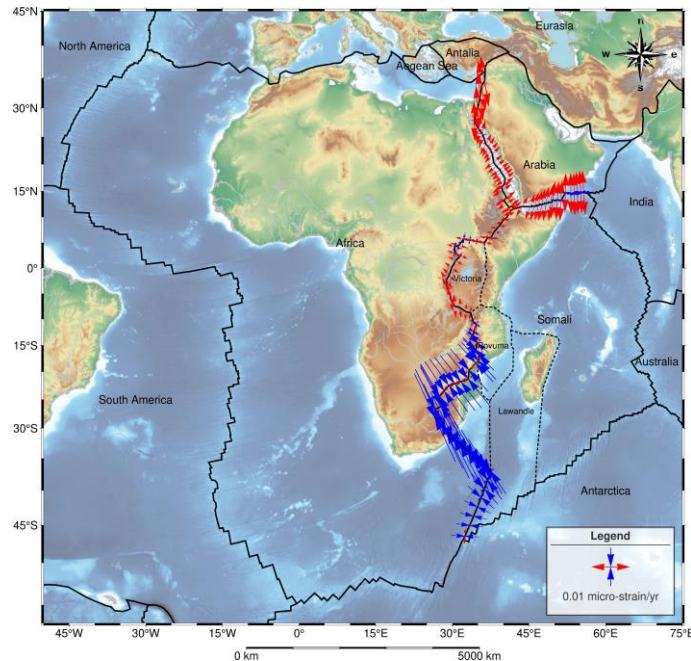


Рисунок 19 – Просторовий розподіл осей деформацій у межах Східноафриканської рифтової системи

Представлені результати (див. рис. 19) підтверджують наявність конвергентних та дивергентних процесів у межах Східноафриканської рифтової системи. Згідно з ними, межа Африканської та Аравійської плит розходиться, але це розходження є різним. Уздовж Червоного моря обидві плити рухаються в різних напрямках, що призводить до подальшого розширення й поглиблення Червономорського рифту. Однак північна частина цієї межі вздовж Синайського півострова й Середземного моря характеризується дещо іншим напрямком дивергентних процесів. Дивергенція Аравійської та Сомалійської плит збільшується зі сходу на захід уздовж Аденської затоки, що призводить до подальшого розширення та поглиблення Аденського хребта. Північна частина межі Африканської та Сомалійської плит також характеризується дивергентними процесами, але вони значно менші у порівнянні з вищеописаними зонами. Незважаючи на значно меншу потужність деформаційних процесів, вони все одно спричиняють утворення рифтових озер, відомих як озера Рифтової долини (у тому числі озера Вікторія, Танганьїка, Малаві та інших). Натомість, південна частина межі Африканської та Сомалійської плит характеризується конвергентними процесами.

У шостому розділі «**Моніторинг регіональних природних та локальних техногенних деформаційних процесів на основі даних ГНСС-вимірювань**» представлено дослідження регіональних природних та локальних техногенних деформаційних процесів на прикладі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-вимірювань. Об'єктами для дослідження в даному розділі слугували: тектонічний

розлом протоки Пенола – каналу Лемера (Антарктида) та територія Дністровської ГАЕС (Україна). Відібрані об’єкти характеризуються різними геодинамічними особливостями. Тектонічний розлом протоки Пенола – каналу Лемера розташований у межах Антарктичної тектонічної плити і загалом позбавлений впливу факторів техногенного характеру, тому демонструє собою унікальний полігон для дослідження сучасних геодинамічних процесів. Натомість територія Дністровської ГАЕС розташована в межах Євразійської тектонічної плити і через будівництво та безперервну експлуатацію інженерних об’єктів піддається потужному техногенному навантаженню. У зв’язку з цим значний науковий інтерес викликає проведення дослідження геодинамічних процесів двох таких об’єктів із зовсім різними геодинамічними особливостями.

Для моніторингу та дослідження сучасних геодинамічних процесів тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера поблизу Української антарктичної станції «Академік Вернадський» у лютому-березні 2003 року було закладено 8 пунктів (bert, barc, fanf, yalo, rete, gosa, tuхе, iriz), а в лютому-квітні 2019 року автором додатково закладено ще 6 пунктів (boot, moot, hovg, spli, scot, lema) геодинамічного полігону. Закладений геодинамічний полігон опирається на 2-а вихідних та 14-ть моніторингових пунктів. Вихідними є пункти sc98 та sc02, які закладені в рамках SCAR98/GAP98 та SCARGPS2002 кампаній. Починаючи з 2003 року на пунктах геодинамічного полігону проведено 5 сезонних циклів ГНСС-вимірювань. Зауважимо, що через дуже складні антарктичні погодні умови, а також відсутність часу в деяких циклах не вдалося провести вимірювання на деяких пунктах.

На основі визначених координат обчислено горизонтальні зміщення пунктів геодинамічного полігону для кожного циклу ГНСС-вимірювань. На рисунку 20 представлено схему векторів горизонтальних зміщень пунктів геодинамічного полігону, визначених за 2003–2019 роки.

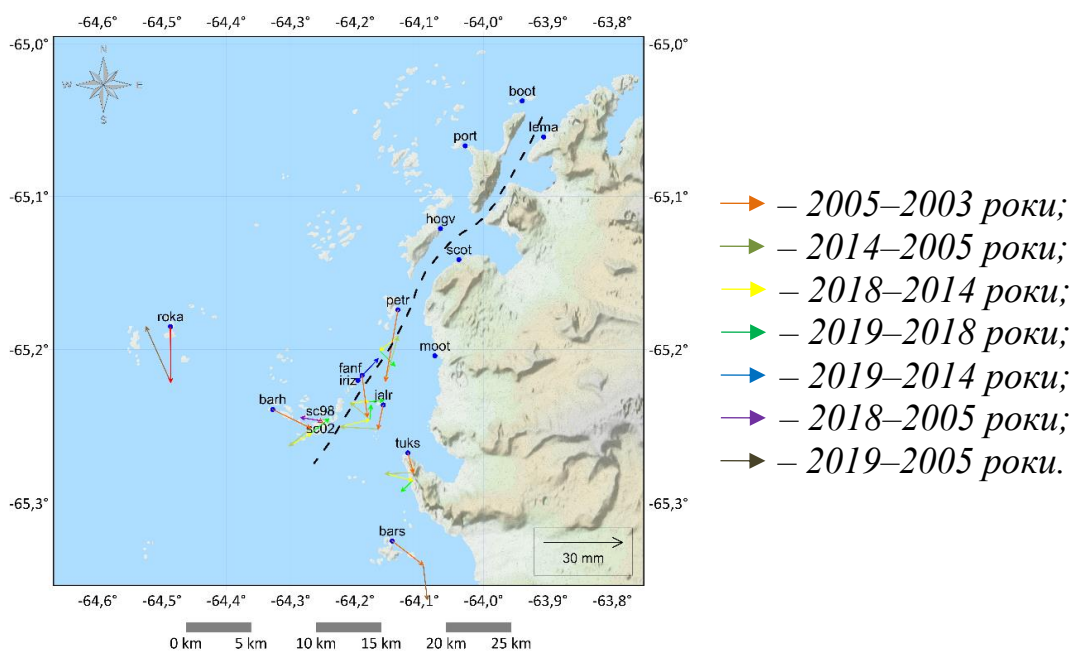


Рисунок 20 – Схема векторів горизонтальних зміщень пунктів геодинамічного полігону моніторингу розлому протоки Пенола – каналу Лемера, визначених упродовж 2003–2019 років (Δ – вихідні пункти; \bullet – моніторингові пункти; --- – розлом протоки Пенола – каналу Лемера)

Аналізуючи представлену схему (див. рис. 20), можна зробити висновок, що вектори горизонтальних зміщень пунктів полігону різнонаправлені, проте більша їх частина (37%) вказує на південний та південно-східний напрямок руху. Довжини визначених векторів горизонтальних зміщень пунктів полігону є різними, що вказує на нерівномірну швидкість горизонтальних рухів досліджуваної території.

Визначені координати ГНСС-пунктів геодинамічного полігону тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера використано для визначення швидкостей горизонтальних зміщень досліджуваного регіону. Отримані значення швидкостей горизонтальних та вертикальних зміщень пунктів геодинамічного полігону використано для ілюстрації просторового розподілу поля швидкостей вертикальних зміщень, швидкостей дилатації, швидкостей загального зсуву земної поверхні у регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера (рис. 21).

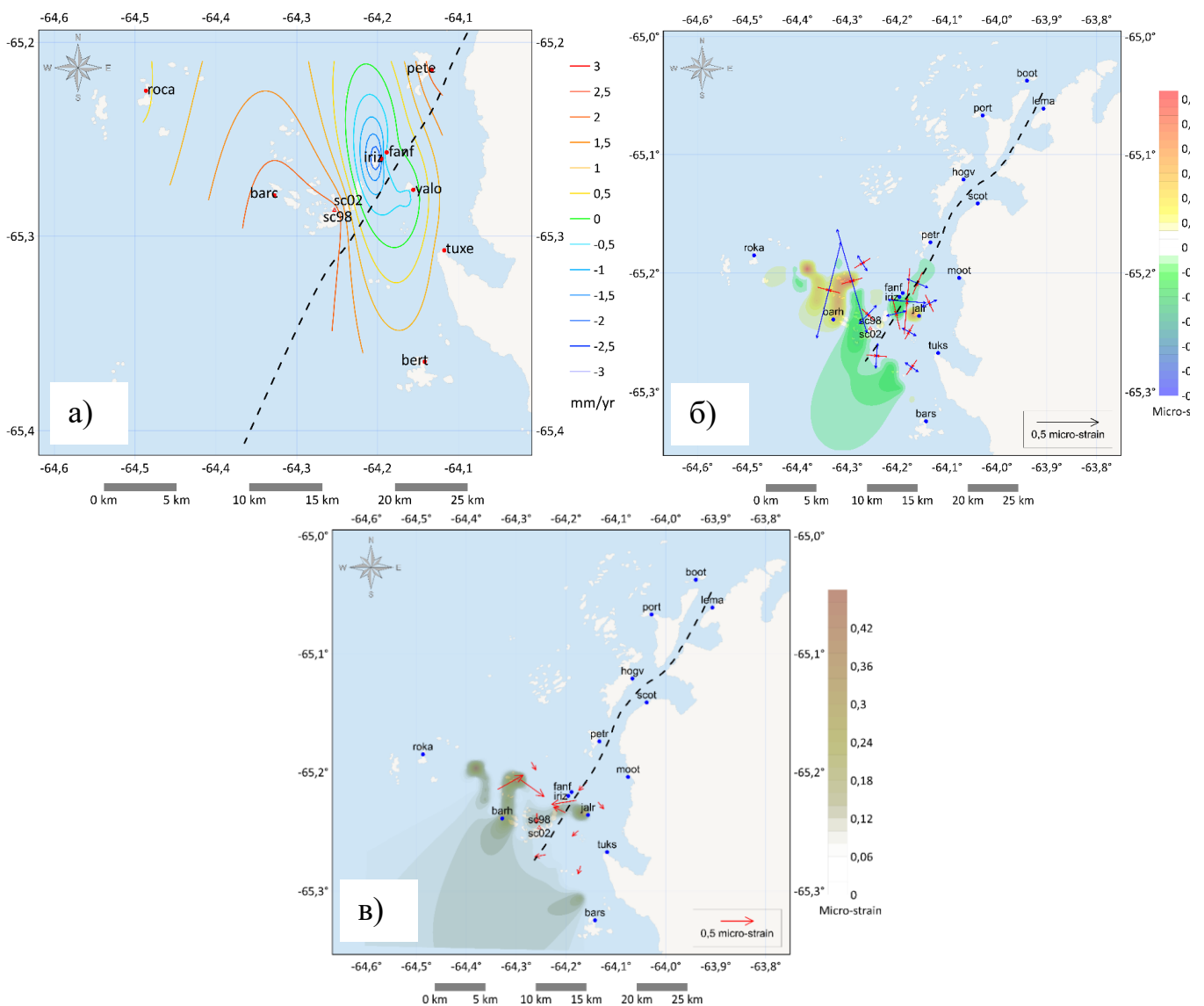


Рисунок 21 – Просторовий розподіл поля а) швидкостей вертикальних зміщень, б) швидкостей дилатації, в) швидкостей загального зсуву земної поверхні у регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера (Δ - вихідні пункти; \bullet – моніторингові пункти; - - - - розлом протоки Пенола – каналу Лемера; \rightarrow \leftarrow – напрямки стиску регіону; \leftarrow \rightarrow – напрямки розширення регіону; \rightarrow – напрямком вектора загального зсуву

Аналізуючи просторовий розподіл поля швидкостей вертикальних зміщень (див. рис. 21а), можна помітити, що загалом регіон розлому протоки Пенола – каналу Лемера зазнає підймання, проте в районі острова Ірізар ідентифікується незначна зона опускання (приблизний радіус 1.4 км). Діапазон вертикальних швидкостей змінюється від -2.5 до 2.5 мм/рік.

У результаті аналізу розподілу поля швидкостей дилатації земної поверхні в регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера (див. рис. 21б) виявлені місця прояву екстремальних значень стиску (більше 0.02 стрейн/рік) та розтягу (менше -0.2 стрейн/рік), які свідчать про підвищену геодинамічну активність досліджуваної території. Виявлено, що в регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера ідентифікуються дві зони розтягу, а також три зони стиску.

У результаті аналізу розподілу поля швидкостей загального зсуву земної поверхні в регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера (див. рис. 21в) виявлено, що місця прояву максимальних значень загального зсуву (більше 0.04 стрейн/рік) співпадають із ідентифікованими зонами стиску та розтягу території досліджень (див. рис. 21б). Також можна стверджувати, що вектори загального зсуву різнонаправлені, що вказує на горизонтальну неоднорідність території досліджень.

Провівши комплексний аналіз представлених результатів (див. рис. 21), а також співставивши їх із даними GMRT (Global Multi-Resolution Topography synthesis), можна припустити наявність ще одного розривного порушення, яке збігається з напрямком фарватерної частини Французької протоки і є майже перпендикулярним до розлому протоки Пенола – каналу Лемера. Додатковим аргументом на існування порушення в межах Французької протоки є просторовий розподіл поля швидкостей вертикальних зміщень у регіоні (див. рис. 21а). Визначені напруження в блоках (див. рис. 21б та 21в) дають змогу припустити природу кінематичного типу розлому протоки Пенола – каналу Лемера (рис. 22).

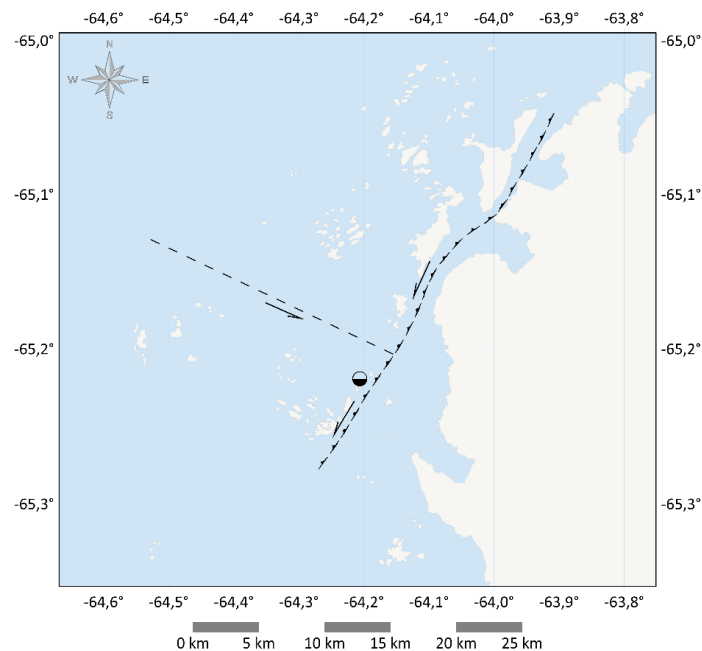


Рисунок 22. – Модель кінематики тектонічних блоків у регіоні розлому протоки Пенола – каналу Лемера (●- зона опускання; - - - - розлом протоки Пенола – каналу Лемера)

Указаний розлом може бути охарактеризований як комбінація насуву та зсуву (strike-slip), що відомий під назвою транспресивний. Тобто, блоки 2 та 3, які знаходяться ліворуч від розлому, насуваються в південно-східному напрямку на блок 1 з одночасним лівостороннім зміщенням (sinistral strike-slip). Такі процеси викликають опускання частини блоку 3, яка прилягає до розлому протоки Пенола – каналу Лемера. Представлена модель є попередньою та ґрунтується винятково на наявних на сьогодні даних ГНСС-вимірювань. Її подальший розвиток повинен базуватись на розширенні площі досліджень у регіоні, а також на комбінації ГНСС та інших можливих геофізичних методів.

У 2003 році для супроводу будівництва та спостереження за деформаціями схилів у районі розташування основних гідроенергетичних споруд створено опорну ГНСС-мережу Дністровської ГАЕС. Закладена мережа складалася з 15 пунктів, умовно поділених на каркасну та робочу мережі, які відповідно налічували 7 та 8 пунктів. Цю мережу можна вважати локальним геодинамічним полігоном. У даний час на досліджуваній території знаходиться 44 пункти опорної ГНСС-мережі. Вигляд опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС в 2017 році представлено на рисунку 23а.

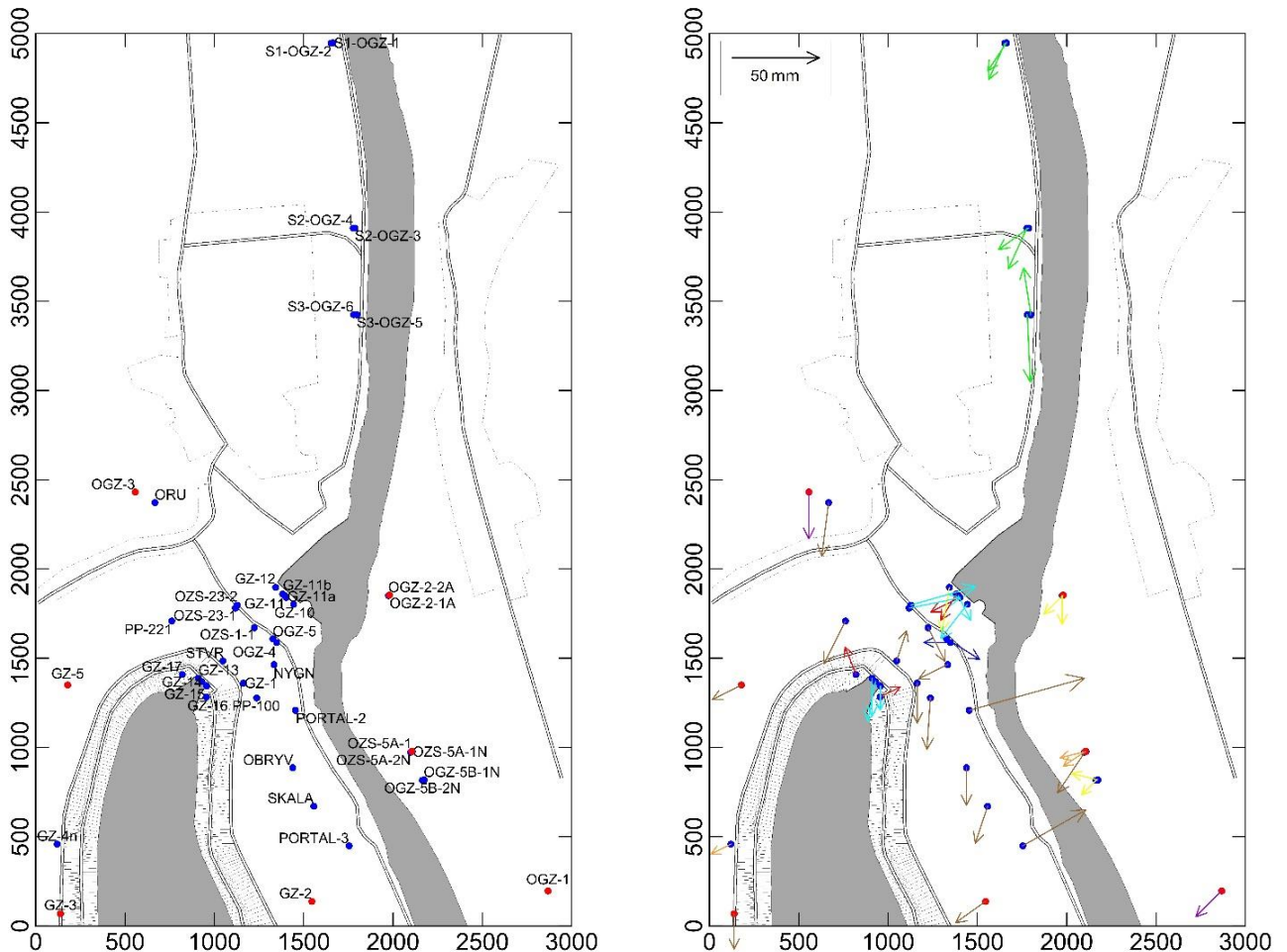


Рисунок 23 – Розташування пунктів у 2017 році (а) та схема векторів горизонтальних зміщень пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС за період 2004–2018 роки (б) (● – пункти каркасної мережі; ● – пункти робочої мережі; → – 2–18 цикли; → – 3–18 цикли; → – 6–18 цикли; → – 9–18 цикли; → – 10–18 цикли; → – 12–18 цикли; → – 14–18 цикли; → – 15–18 цикли)

З 2004 року на пунктах опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС проводяться періодичні статичні супутникові вимірювання (сезонними циклами), також на даних пунктах проводяться періодичні цикли високоточного нівелювання.

У даному дослідженні опрацьовано 18 циклів ГНСС-вимірювань і отримано координати пунктів у кожному з них. На основі визначених координат обчислено горизонтальні зміщення пунктів для кожного циклу вимірювань. На рисунку 236 представлено схему векторів горизонтальних зміщень пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС, визначених за весь період вимірювань (2004–2017 роки).

Вектори горизонтальних зміщень пунктів робочої мережі (див. рис. 236) мають різні напрямки, проте більша їх частина вказує на південний та південно-західний напрямок руху. Такий самий напрямок руху спостерігається і на всіх пунктах опорної мережі. Південний та південно-західний напрямок руху пунктів, розташованих навколо верхнього водоймища, очевидно, зумовлений штучним навантаженням частини території введенням в експлуатацію верхнього водоймища на всій площі до відмітки 220.5 метрів об'ємом 19.3 млн. м³ (26 жовтня 2012 року). Найінтенсивніші горизонтальні зміщення різних напрямків зафіксовані в зоні будівництва основних споруд.

Опорну ГНСС-мережу Дністровської ГАЕС використано для дослідження впливу техногенних факторів на геодинамічну ситуацію в районі Дністровського гідроенергетичного комплексу, а також аналізу її зміни до та після заповнення Дністровського верхнього водосховища. Використовуючи результати ГНСС-вимірювань, виконаних упродовж 2004–2018 років, обчислено вектори горизонтальних зміщень пунктів мережі до (січень 2004 – жовтень 2011рр.) та після (жовтень 2012 – жовтень 2018рр.) заповнення Дністровського верхнього водосховища. Оскільки тривалість циклів вимірювань на пунктах була різною, то виконано перехід від обчислених векторів горизонтальних зміщень пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС до їх середніх швидкостей за період досліджень. Зазначимо, що до заповнення водосховища значна частина пунктів (34%) мала південно-західний напрямок руху, натомість, після заповнення водосховища кількість пунктів із південно-західним напрямком руху збільшилась до 43%, а також з'явилась велика група пунктів (39%) із південно-східним напрямком руху. Зміна напрямку руху пунктів, очевидно, обумовлена штучним навантаженням частини території введенням в експлуатацію Дністровського верхнього водосховища. Також зміна напрямку руху пунктів підтверджує припущення, що територія досліджень розміщена в зоні, де відбувається зміна знаку сучасних тектонічних рухів.

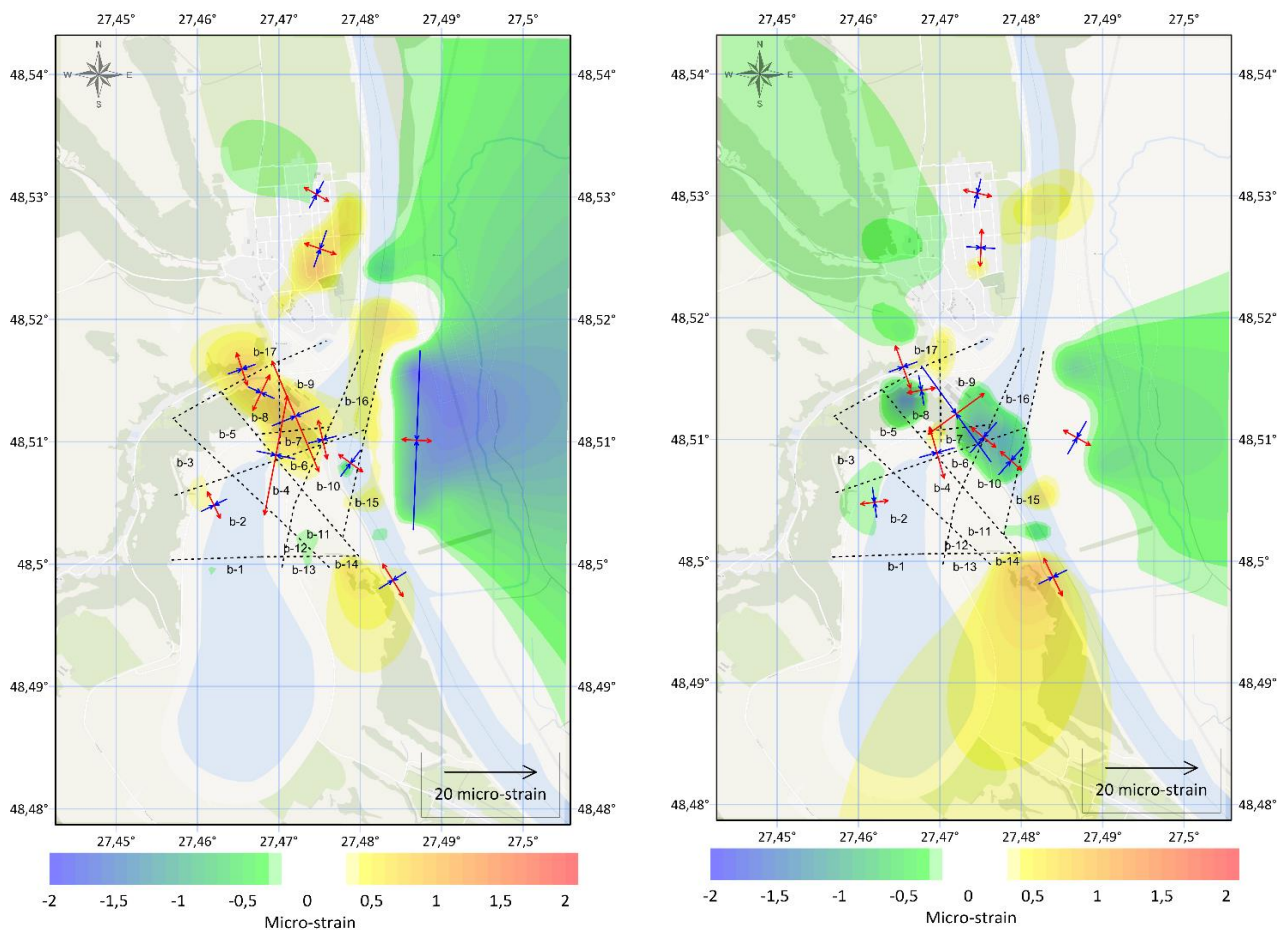
Значення швидкостей горизонтальних зміщень використано для побудови просторового розподілу поля швидкостей дилатації земної поверхні досліджуваного району до та після заповнення Дністровського верхнього водосховища (рис. 24).

У результаті аналізу розподілу швидкостей дилатації (див. рис. 24) виявлено місця екстремальних значень стиснення (більше 0.2 стрейн/рік) та розширення (менше -0.2 стрейн/рік), що свідчить про підвищену геодинамічну активність регіону. Екстремальні значення дилатації зафіксовано на південно-східному та східному схилах Дністровського верхнього водосховища (блоки 6, 7, 8, 10, 17 та 14, 15), а також у районі будівництва основних споруд Дністровської ГАЕС (блоки 9, 10 та 16).

Перед заповненням Дністровського верхнього водосховища, на схилі та в районі забудови основних споруд чітко простежуються процеси стиснення, які, очевидно, зумовлені штучним розвантаженням масиву виїмками ґрунту у водосховищі,

підземними роботами та відкачуванням води. Натомість, після заповнення Дністровського верхнього водосховища простежується зміна знаку дилатації, тому на схилі та в зоні забудови основної споруди переважають процеси розширення, які, очевидно, зумовлені прогином поверхні й збільшенням нахилу схилу через підсилення.

Загалом існує тісний зв'язок між екстремальними значеннями середніх швидкостей зміщень пунктів і техногенним навантаженням, яке виникло за рахунок будівництва першої черги Дністровської ГАЕС. Наприклад, спостерігається збільшення значень середніх швидкостей зміщень пунктів практично на всіх блоках після монтажу та експериментального пуску першого гідроагрегату (21.12.2008 р.), а також після введення в експлуатацію Дністровського верхнього водосховища по всій площі (26.10.2012 р.). Проте введення в експлуатацію першого гідроагрегату (20.12.2009 р.) та монтаж і введення в експлуатацію другого гідроагрегату (22.12.2013 р.) призвели до зменшення значень середніх швидкостей зміщень пунктів. Наведені дані свідчать про те, що надзвичайно потужний вплив на геодинамічну ситуацію в районі Дністровської ГАЕС спричинив монтаж і введення в експлуатацію третього гідроагрегату. З цієї причини значення середніх швидкостей зміщення пунктів зросли в кілька разів у всіх блоках і майже не зменшувалися в наступних циклах.



a) до заповнення верхнього водосховища б) після заповнення верхнього водосховища
 Рисунок 24 – Просторовий розподіл поля швидкостей дилатації земної поверхні в регіоні Дністровської ГАЕС до та після заповнення Дністровського верхнього водосховища (.... – основні зони розломів другого та третього порядків; b-1 ... b-16 – тектонічні блоки; $\rightarrow\leftarrow$ – осі деформацій стиску; $\leftarrow\rightarrow$ – осі деформацій розтягу)

Зазначимо, що в перших чотирьох циклах спостерігаються великі значення середніх швидкостей зміщення пунктів, але оскільки вони мають тенденцію до затухання, то, на нашу думку, це пов'язано з тривалим періодом стабілізації схилу після монтажу нового обладнання. Отримані значення азимутів зміщення пунктів не мають такого чіткого зв'язку з основними етапами будівництва першої черги Дністровської ГАЕС, але їх періодичні зміни, очевидно, також є причиною впливу техногенних факторів.

ВИСНОВКИ

Результати теоретичних і експериментальних досліджень виконаних у дисертаційній роботі дали можливість вирішити важливу науково-технічну проблему розроблення диференціації кінематики тектонічних структур за даними проведених та вільно доступних ГНСС-вимірювань, шляхом розроблення нових та удосконалення існуючих методик та алгоритмів, які дають змогу удосконалити процес диференціації у глобальному, регіональному та локальному масштабах для забезпечення кращого розуміння сучасних геодинамічних процесів. Проведені дослідження та отримані результати є важливими для геодезії, геодинаміки та суміжних дисциплін зокрема для прогнозування сучасних геодинамічних процесів, уточнення існуючих та розроблення нових систем координат, а також моніторингу деформаційних процесів. Головні наукові та практичні результати цих досліджень можна сформулювати наступним чином:

1. Удосконалено методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань. На основі удосконаленої методики визначено сучасні ротаційні параметри основних тектонічних плит, отримані значення характеризуються покращенням точності до 70% у порівнянні з відомими моделями, через урахування безперервності та рівномірності розподілу ГНСС-вимірювань упродовж спостережень.

2. Уточнено модель сучасних рухів основних тектонічних плит для періоду 2002–2021 років у системі координат ITRF2014/IGS14, яка охоплює 92.59% поверхні Землі та забезпечує можливість прогнозування руху тектонічних плит з точністю до 20 мм. Визначено, що загалом здобуті значення добре узгоджуються з відомими моделями рухів тектонічних плит, особливо з ITRF2014.

3. Розроблено методику визначення сучасних значень динамічних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій, а також інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, отриманої із моделі CRUST1.0. Апробацію розробленої методики виконано на прикладі визначення динамічних параметрів основних тектонічних плит. Виявлено, що точність визначення динамічних параметрів становить менше 5.5% від значення цих параметрів.

4. Оцінено просторово-часові взаємозв'язки між розподілом ротаційних та динамічних параметрів основних тектонічних плит і нерівномірністю обертання Землі. Підтверджено, що Тихоокеанська та Австралійська тектонічні плити фактично задають динаміку всіх сучасних рухів основних тектонічних плит.

5. Інстальовано та введено в дію першу українську перманентну ГНСС-станцію в Антарктиді – ASAV біля Української антарктичної станції «Академік Вернадський». Дані

її вимірювань використано для уточнення параметрів сучасних геодинамічних процесів у межах Антарктичної тектонічної плити. Підтверджено, що вектори швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій у межах Антарктичної тектонічної плити мають ротаційний характер (за годинниковою стрілкою).

6. Уточнено параметри сучасних геодинамічних процесів у межах Африканської системи тектонічних плит за період 2002–2021 років шляхом урахування сезонності деформаційних процесів. Підтверджено, що вектори швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій у межах Африканської системи тектонічних плит мають північно-східний напрямок. Африканська система тектонічних плит характеризується доволі складною динамікою деформаційних процесів, яка представлена конвергентними та дивергентними процесами.

7. Отримано параметри сучасних регіональних природних геодинамічних процесів у межах тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера, на основі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній та запропоновано нову кінематичну модель регіону.

8. Отримано параметри сучасних локальних техногенних геодинамічних процесів у межах території Дністровської ГАЕС на основі, проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній. Підтверджено, що Дністровський гідроенергетичний комплекс можна вважати одним із об'єктів, де зафіксовано явище наведеної сейсмічності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові статті, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації
 - 1.1 Статті в наукових періодичних виданнях, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science
 1. Savchyn, I., & Vaskovets, S. (2018). Local geodynamics of the territory of Dniester pumped storage power plant. *Acta Geodyn. Geomater.*, 15(1), 189, 41–46, <https://doi.org/10.13168/AGG.2018.0002>
 2. Savchyn, I., & Pronyshyn, R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dniester Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11(5), 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001>
 3. Savchyn, I., Tretyak, K., Hlotov, V., Shylo, Y., Bubniak, I., Golubinka, I., & Nikulishyn, V. (2021). Recent local geodynamic processes in the Penola Strait—Lemaire Channel fault area (West Antarctica). *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 18(2), 202, 253–265, 2021. <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0018>
 4. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M. (2021). Analysis of inclinometric observations and prediction of soils deformations in the area of the Dniester PSPP, *Geodynamics*, 1(30), pp. 17-24, <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017>
 5. Savchyn, I., Otruba, Y., & Tretyak, K. (2021). The first Ukrainian permanent GNSS station in Antarctica: processing and analysis of observation data. *Ukrainian Antarctic journal*, (2), 3-11. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2021.674>
 6. Savchyn, I. (2022). Establishing the correlation between changes of absolute rotation poles of major tectonic plates based on continuous GNSS stations data, *Acta Geodyn. Geomater.*, 19, No. 2 (206), 167–176, 2022. <https://doi.org/10.13168/AGG.2022.0006>

7. **Savchyn, I.** (2022). Determination of the recent rotation poles of the main tectonic plates on the base of GNSS data, *Geodynamics*, 2(33), pp. 17-27, <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.017>
8. **Savchyn, I.**, Brusak, I., & Tretyak, K. (2023). Analysis of recent Antarctic plate kinematics based on GNSS data. *Geodesy and Geodynamics*. 14(2). 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.08.004>
9. **Savchyn, I.** (2023). Analysis of recent African tectonic plate system kinematics based on GNSS data, *Acta Geodyn. Geomater.*, 20, No. 2 (210), 19–28, 2022. <https://doi.org/10.13168/AGG.2023.0003>
10. **Savchyn, I.**, & Tretyak, K. (2023). Tectonic plates moment of inertia and angular momentum determination: the case of the Antarctic plate. *Ukrainian Antarctic Journal*, 21(1), 13–23. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2023.704>
11. Tretyak, K., Bisovetskyi, Yu., **Savchyn, I.**, Korlyatovych, T., Chernobyl, O., & Kukhtarov, S. (2023). Monitoring of spatial displacements and deformation of hydraulic structures of hydroelectric power plants of the Dnipro and Dniester cascades (Ukraine), *Journal of Applied Geodesy* vol. 16, no. 4, 2022, pp. 351-360. <https://doi.org/10.1515/jag-2023-0021>

1.2. Статті в наукових фахових виданнях України

12. Ломпас, О. В., Яхторович, Р. І., & **Савчин, І. Р.** (2016). Дослідження добового руху ГНСС-станції BRGN. *Геодинаміка*. 1 (20), с.21-31, <https://doi.org/10.23939/JGD2016.01.021>
13. **Савчин, І.** (2022). Визначення сучасних ротаційних параметрів Євразійської плити на основі ГНСС-даних. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2(44), с.42-48 <https://doi.org/10.1819-1339-2-44-42-48>
14. Zyhar, A., Yushchenko, Y. & **Savchyn, I.** (2023). A study of the influence of water level fluctuations on the geodynamic situation in the natural and technical geosystem of the Dniester HPP and PSPP cascade, *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, (97), pp.24-31, <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024>

2. Наукові праці в збірках матеріалів конференцій

2.1. Публікації в збірниках матеріалів конференцій, що входять до наукометричної бази даних Scopus

15. **Savchyn, I.**, & Zyhar, A. (2020, December). Analysis and interpretations of recent local vertical movements of Dniester PSPP territory determined from precise levelling. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205702>
16. **Savchyn, I.**, Tretyak, K., Marusazh, K., & Korliatovych, T. (2021, October). Processing and analysis of measurement results of the Ukrainian GNSS station ASAV (Argentina Islands, West Antarctica). In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3032>
17. Zyhar, A., **Savchyn, I.**, Yushchenko, Y., & Zakrevskyi, O. (2021, October). Evaluation of changes in rock characteristics based on analysis and interpretation of seismicacoustic observations in the area of the natural and technical system of Dniester PSPP. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3008>

18. **Savchyn, I.** (2022, November). Migration of Average Annual Rotation Poles of Antarctic Plate during 1995-2021 by GNSS Data. In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). EAGE Publications BV. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580045>
19. **Savchyn, I., & Bilashuk, A.** (2023, October). Differentiation of recent geodynamic processes within the Carpathian Mountains based on GNSS data. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023» (Vol. 2023, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510011>

2.2. Публікації в збірниках матеріалів конференцій

20. **Savchyn, I., Vovk, A., & Vaskovets, S.** (2016, November). Research of Local Deformation Processes of the Dniester PSPP Territory at 2010–2015. In LEA GAC-2016, pp.123-126
21. **Савчин, І., Вовк, А., & Васьковець, С.** (2016, Грудень). Дослідження динаміки горизонтальних рухів території Дністровської ГАЕС за даними ГНСС-спостережень (2004-2015 рр.). В збірнику статей GeoTerrace-2016, с.35-39
22. **Savchyn, I., Romanovskyi, A., & Danyliv, N.** (2018, November). Research of horizontal movements of the earth's crust in the archipelago Argentine islands (Antarctica) during period 2003-2018, In International joint forum LEA'2018 & YSTCMT'2018 GAC-2018, pp.37-40
23. **Savchyn, I., Danyliv, N., Zygar, A., & Romanovskyi, A.** Research of vertical dynamics of Earth's surface movements in areas of Dniester PSP., In International joint forum LEA'2018 & YSTCMT'2018 GAC-2018, pp.123-127
24. **Савчин, І., Романовський, А., Данилів, Н.** (2018, Грудень). Дослідження горизонтальних рухів земної кори архіпелагу Аргентинські острови (Антарктида) впродовж 2003-2018 років. В збірнику статей GeoTerrace-2018, с. 96-99
25. **Савчин, І., Данилів, Н., Зигар, А., Романовський, А.,** (2018, Грудень). Дослідження динаміки вертикальних рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС впродовж 1999-2018 років. В збірнику статей GeoTerrace-2018, с. 5-6
26. **Бахмутов, В., Богілло, В., Митрохин, О., Накалов, Є., Отруба, Ю., Пішняк, Д., Савчин, І., Шило, Є.** (2019, Квітень). Геолого-геофізичні дослідження під час сезону у 24-й УАЕ: попередні результати і перспективи. В збірнику статей ІХ Міжнародної антарктичної конференції
27. **Savchyn, I.** (2020, August). The field of linear velocities and movements of the Earth's crust in the Penola Strait - Lemaire Channel fault area (West Antarctica). In SCAR OPEN SCIENCE CONFERENCE 2020 (Online), P.40
28. **Savchyn, I., Tretyak, K.** (2021, May). Crystal strain analysis in the Penola Strait - Lemaire Channel fault area. In X International Antarctic Conference, pp. 70-71
29. **Savchyn, I.** (2021, August). Antarctic Plate absolute rotation poles determination based on continuous GNSS stations data. In 10th SCAR OPEN SCIENCE CONFERENCE (Online), e-Poster, <https://virtual.scar2022.org/eposter-detailes.php?token=Mzcz>

АНОТАЦІЯ

Савчин І.Р. Диференціація кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка», МОН України, Львів, 2024.

У дисертаційній роботі проведено аналіз досліджень з диференціації просторових рухів тектонічних структур на основі даних вимірювань глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Опрацьовано методи дослідження даних ГНСС-вимірювань, визначено їх недоліки та переваги. Представлено аналіз використання ГНСС-даних для створення моделей сучасних рухів тектонічних плит, а також деформацій земної поверхні.

У рамках виконання дисертаційної роботи автор удосконалив методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій, яка підвищує точність визначення шляхом урахування безперервності та рівномірності розподілу даних упродовж спостережень. Апробацію вдосконаленої методики виконано на прикладі визначення ротаційних параметрів основних тектонічних плит. Підтверджено, що ця методика забезпечує покращення точності визначення ротаційних параметрів у середньому на 19% у порівнянні з NNR-MORVEL56, на 70% у порівнянні з ITRF2000 та на 11% у порівнянні з ITRF2014. Також удосконалена методика забезпечує ідентичну точність із ITRF2020.

За допомогою цієї методики визначено складові швидкостей горизонтальних зміщень 3169 перманентних ГНСС-станцій, розташованих на 7-ми великих, 7-ми середніх та 3-х мікроплитах, за період 2002–2021 років, у системі ITRF2014/IGS14. Точність визначення складових векторів горизонтальних зміщень знаходиться в межах 0.9–6.4 мм та складає в середньому 10–15% від довжини вектора.

У дисертаційній роботі автором розроблено методику визначення сучасних значень динамічних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій, а також інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, отриманої з моделі CRUST1.0. Апробацію розробленої методики виконано на прикладі визначення моментів інерції, моментів імпульсу, а також кінетичної енергії основних тектонічних плит. Виявлено значну різноманітність у моментах інерції, моментах імпульсу та кінетичних енергіях між різними тектонічними плитами. Використання розробленого методу дає можливість точного визначення динамічних параметрів у межах 5.5% від їхнього значення. Підтверджено, що Тихоокеанська та Австралійська тектонічні плити фактично задають динаміку руху всім основним сучасним тектонічним плитам.

У роботі також проведено просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між зміною ротаційних та динамічних параметрів великих тектонічних плит і нерівномірністю обертання Землі. Підтверджено, що зміни вказаних параметрів є дуже різними. Також виявлено взаємозв'язки між їх зміною. Визначено, що збільшення кутової швидкості обертання Землі сповільнює рух Антарктичної тектонічної плити, яка рухається в протилежному до обертання Землі напрямку та прискорює рух Тихоокеанської тектонічної плити, яка рухається в напрямку обертання Землі.

Підтверджено, що динаміка моментів імпульсу та кінетичної енергії великих тектонічних плит є більшою за динаміку умовного моменту імпульсу та умовної кінетичної енергії Землі. Тобто, динаміка великих тектонічних плит взаємно компенсується для збереження умовних моментів імпульсу та умовної кінетичної енергії Землі сталими. Проте очевидно, що дана динаміка не є визначальним фактором такої компенсації, оскільки тектонічні плити займають тільки 2–3% від загального об'єму Землі, а на зміну вказаних параметрів впливають також інші, значно більші за об'ємом оболонки Землі (ядро, мантія, тощо).

У рамках виконання дисертаційної роботи автором удосконалено методику визначення деформаційних параметрів на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій із врахуванням сезонності деформаційних процесів. Апробацію удосконаленого методу виконано на прикладі визначення деформаційних параметрів Антарктичної тектонічної плити та Африканської системи тектонічних плит.

Інстальовано та уведено в дію першу українську перманентну ГНСС-станцію в Антарктиді – ASAV біля Української антарктичної станції «Академік Вернадський». Дані її вимірювань використано для уточнення параметрів сучасних геодинамічних процесів у межах Антарктичної тектонічної плити.

Уточнено параметри сучасних геодинамічних процесів у межах Африканської системи тектонічних плит за період 2002–2021 років з урахуванням сезонності деформаційних процесів.

Визначено параметри сучасних регіональних природних геодинамічних процесів у межах тектонічного розлому протоки Пенола – каналу Лемера на основі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній і запропоновано нову кінематичну модель регіону.

Також оцінено параметри сучасних локальних техногенних геодинамічних процесів у межах території Дністровської ГАЕС на основі проведених автором періодичних (сезонних) ГНСС-кампаній. Підтверджено, що Дністровський гідроенергетичний комплекс можна вважати одним із об'єктів, де зафіксовано явище наведеної сейсмічності.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені під час виконання науково-дослідних робіт у рамках «Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки», а саме: «Дослідження сучасної геодинаміки земної кори на геофізичному та геодезичному полігонах в районі антарктичної станції «Академік Вернадський» (0118U007210с, № Н/06-2018 від 19.11.2018 р.), «Дослідження сучасних рухів земної кори в районі, прилеглому до антарктичної станції «Академік Вернадський», активності тектонічного розлому в районі протоки Пенола» (0119U103218, № Н/06-2019 від 01.10.2019 р.); «Просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між розподілом динамічних параметрів Антарктичної тектонічної плити і моментом імпульсу Землі, атмосфери та океану» (0120U104495, № Н/18-2020 від 21.09.2020 року); «Дослідження на глобальному, регіональному та локальному рівні сучасних просторових рухів земної кори Антарктиди та встановлення їх взаємозв'язку з динамікою гідросфери» (0121U112434 № Н/22-2021 від 16.07.2021 р.).

Вхідні дані для виконання дисертаційних досліджень частково отримані автором у рамках виконання наукових і науково-технічних робіт під час 23-ої та 24-ої сезонних українських експедицій у 2018–2019 роках на антарктичній станції «Академік Вернадський». А також під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт

«Дністровська ГАЕС. Визначення горизонтальних переміщень пунктів опорної геодезичної мережі методом GPS» (0117U0007363, 2013–2021 роки).

Ключові слова: ГНСС-вимірювання; тектонічні структури; ротаційні параметри; динамічні параметри; деформаційні процеси; деформаційні параметри.

ANNOTATION

Ihor Savchyn. Differentiation of the kinematics of tectonic structures based on GNSS measurements – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in the specialty 05.24.01 – Geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The dissertation analyzes studies on the differentiation of spatial movements of tectonic structures on the basis of global navigation satellite systems (GNSS) data. Methods of studying data of GNSS measurements have been worked out, their advantages and disadvantages have been determined. An analysis of the use of GNSS data to create models of recent movements of tectonic plates, as well as deformations of the earth's surface, is presented.

As part of the dissertation, the author has improved the methodology for determining recent rotational poles of tectonic plates based on the study of time series of daily solutions of permanent GNSS stations, which increases the accuracy of determination by taking into account the continuity and uniformity of data distribution during observations. Testing of the improved method was performed on the example of determining the rotational poles of the main tectonic plates. It is confirmed that this technique provides an improvement in the accuracy of determining rotational poles by an average of 19% compared to NNR-MORVEL56, 70% compared to ITRF2000 and 11% compared to ITRF2014. Also, the improved technique provides identical accuracy with ITRF2020.

Using this technique, the components of horizontal movements velocity of 3169 permanent GNSS stations located on 7 large, 7 medium and 3 microplates for the period 2002–2021 in the ITRF2014/IGS14 system were determined. The accuracy of determining the component vectors of horizontal movements is within 0.9–6.4 mm and averages 10–15% of the vector length.

In the dissertation the author developed a methodology for determining the recent values of the dynamic parameters of tectonic plates based on the study of time series of daily solutions of permanent GNSS stations, as well as information on the thickness and distribution of the density of the earth's crust layers, obtained from the CRUST1.0 model. Testing of the developed technique is performed on the example of determining the moment of inertia, angular momentum, as well as the kinetic energy of the main tectonic plates. A significant diversity in the moment of inertia, angular momentum and kinetic energies between different tectonic plates has been identified. Using the developed method makes it possible to accurately determine the dynamic parameters within 5.5% of their value. Analyze of these parameters confirmed that the Pacific and Australian tectonic plates actually set the recent movement dynamics of main tectonic plates.

In the work also were conducted a space-time analysis of the interconnections between the change in the rotational and dynamic parameters of large tectonic plates and the uneven rotation of the Earth. Changes to these parameters are confirmed to be very different. The interconnections between their changes were also revealed. It is determined that the increase in the angular velocity of the Earth rotation slows down the movement of the Antarctic tectonic plate, which moves in the opposite direction to the Earth rotation and accelerates the movement of the Pacific tectonic plate, which moves in the direction of the Earth rotation.

It is confirmed that the dynamics of angular momentum and kinetic energy of large tectonic plates is greater than the dynamics of the conditional angular momentum and the conditional kinetic energy of the Earth. That is the dynamics of large tectonic plates are mutually compensated to keep the conditional angular momentum and the conditional kinetic energy of the Earth constant. However, it is obvious that these dynamics is not a determining factor of such compensation, since tectonic plates occupy only 2–3% of the total volume of the Earth, and other, much larger in volume of the Earth's shell (core, mantle, etc.) also affect the change in these parameters.

As part of the dissertation, the author improved the methodology for determining deformation parameters based on the study of time series of daily solutions of permanent GNSS stations, taking into account the seasonality of deformation processes. Testing of the improved method was carried out on the example of determining the deformation parameters of the Antarctic tectonic plate and the African tectonic plate system.

The first Ukrainian permanent GNSS station in Antarctica – ASAV near the Vernadsky station was installed and put into operation. Its measurement data were used to clarify the parameters of recent geodynamic processes within the Antarctic tectonic plate.

The parameters of recent geodynamic processes within the African system of tectonic plates for the period 2002–2021 have been clarified, taking into account the seasonality of deformation processes.

The parameters of recent regional natural geodynamic processes within the boundaries of the tectonic fault of the Penola Strait - the Lemer Canal (Antarctica), were determined on the basis of periodic (seasonal) GNSS campaigns conducted by the author and a new kinematic model of the region was proposed.

The parameters of recent local technogenic geodynamic processes within the territory of the Dnister PSPP were also evaluated on the basis of periodic (seasonal) GNSS campaigns conducted by the author. It is confirmed that the Dnister hydropower complex can be considered one of the objects where the phenomenon of induced seismicity is recorded.

The results of the dissertation work were introduced during the implementation of research works within the framework of the «State target scientific and technical program for research in Antarctica for 2011–2020», namely: «Study of recent geodynamics of the earth's crust at geophysical and geodetic polygons in the area of the Vernadsky station» (0118U007210s, No. N/06-2018 of 19.11.2018), «Study of recent movements of the earth's crust in the area adjacent to the Vernadsky station, tectonic fault activity in the Penola Strait area» (0119U103218, No. N/06-2019 of 01.10.2019); «Space-time analysis of the interconnections between the distribution of dynamic parameters of the Antarctic tectonic plate and the angular momentum of the Earth, atmosphere and ocean» (0120U104495, No. N/18-2020 of 21.09.2020); «Research at the global, regional and local level of recent spatial movements of the Antarctic crust and establishing their interconnection with the dynamics of the hydrosphere» (0121U112434 No. H/22-2021 of 16.07.2021).

The input data for the implementation of dissertation research was partially obtained by the author in the framework of scientific and technical work during the 23rd and 24th seasonal Ukrainian expeditions in 2018–2019 at the Vernadsky station. As well as during the performance of contractual research works «Dnister PSPP. Determination of horizontal movements of control geodetic network points by GPS method» (0117U0007363, 2013–2021).

Keywords: GNSS-measurement; tectonic structures; rotation poles; dynamic parameters, deformation processes; deformation parameters.