

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Савчина Ігора Романовича на тему

«Диференціація кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань», що подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

### *1. Оцінка актуальності дисертаційного дослідження*

На сьогоднішній день світові мережі перманентних ГНСС-станцій розвиваються високими темпами, і охоплюють все більші території Землі. Це дає фахівцям чудову можливість накопичення довготривалих рядів спостережень та використовувати їх у своїй науковій та науково-технічній діяльності. В свою чергу хочу відмітити швидкий розвиток геодезичних методів спостережень, які дозволяють проводити моніторинг просторових рухів об'єктів на міліметровому рівні. Весь даний науково-технічний прогрес відкриває нові перспективи для вивчення кінематики і геодинаміки Землі. Ми розуміємо, що технології глобальних навігаційних супутникових систем є джерелом інформації про динаміку сучасних рухів земної поверхні, які визначаються на основі зміщень перманентних ГНСС-станцій. Комплексний аналіз, узагальнення та інтерпретація рухів земної поверхні в межах певних тектонічних структур забезпечує можливість визначення рухів земної кори.

Автор розуміє, що сучасні геодезичні технології, у поєднанні з великою кількістю та швидкістю накопичення даних, порушують питання необхідності розроблення нових та удосконалення наявних методів опрацювання геодезичних спостережень. Ці методи, звичайно, ми можемо використовувати для подальшої інтерпретації геодинамічних процесів Земної поверхні. Автор запропонував використати класичні методи теоретичної механіки у дослідженнях сучасних динамічних систем. Цікаво те, що в основу своїх досліджень Автор поклав відому теорему Л. Ейлера 18-го сторіччя по динаміці твердого тіла. Використовуючи цю теорему, ми 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.

Хотілось відмітити, що ротаційні параметри тектонічних структур стають основою для розроблення нових та уточнення наявних земних референціальних систем координат, які є необхідними для розв'язання більшості геодезичних задач. Забезпечення точності, надійності та стабільності земних референціальних систем через постійне врахування сучасних геодинамічних процесів вважаю новим направленням і надзвичайно актуальним завданням.

Для дослідження динаміки руху земної кори необхідно постійно у режимі реального часу опрацьовувати та оновлювати геометричні моделі ділянок Землі. Актуальність даного процесу полягає в тому, що такі моделі відкривають нові можливості для комплексного аналізу, диференціації кінематики тектонічних структур та прогнозування геодинамічних процесів. Це дозволить нам глибше розуміти взаємозв'язки між геосистемами. 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 та інфраструктуру.

Відомо, що ротаційні параметри, які є основою моделей сучасних рухів земної кори, є динамічними. Їх динаміка спричинена нерівномірністю обертання Землі та пов'язана із перерозподілом динамічних параметрів тектонічних структур. До таких параметрів відносять момент інерції, момент імпульсу та кінетичну енергію. У своїх дослідженнях автор враховує фундаментальний закон збереження імпульсу та енергії, з якого ми можемо припустити, що зміни динамічних параметрів тектонічних структур взаємно компенсуються для збереження сталості моменту імпульсу та кінетичної енергії Землі. У зв'язку з цим вважаю, що розроблення методик для визначення динамічних параметрів тектонічних структур, а також оцінювання просторово-часового взаємозв'язку між зміною цих параметрів і нерівномірністю обертання Землі є вкрай важливою актуальною проблемою. Такі взаємозв'язки є необхідними для розуміння фундаментальних процесів у тілі Землі,



особливо якщо врахувати систематичне зростання швидкості обертання Землі після за останнє десятиріччя.

Хотілось би відмітити ще одне сучасне направлення дисертаційного дослідження, як розробка 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 та ідентифікувати зони підвищеного ризику. Це нам дасть можливість більш оперативно реагувати на зміни земної кори: виникнення землетрусів, виверження вулканів, обміління морських басейнів, гороутворення тощо.

Значний науковий інтерес викликають дослідження автором 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 вважаю, що актуальність диференціації таких деформаційних процесів є важливою актуальною задачею. 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.

Хотілось би надати особливу повагу автору, що він також торкнувся великої трагедії Українського суспільства, як російської військової агресії. Ми всі на собі

відчули наслідки обстрілів та бомбардування Української землі. Багато хто з нас на все життя запам'ятає як тремтить земля від ракет та бомб. Автор розглядає можливість застосування його наукових розробок для моніторингу локальних деформаційних процесів на територіях енергетичних об'єктів. 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 виконані автором дослідження на території Дністровської ГАЕС, яка через свою велику потужність і гідроакумуляційні особливості є критично важливою для енергетичної системи нашої держави. Ніякого сумніву не виникає об важливості цих задач.

Вважаю, що дисертаційне дослідження розв'язує сучасні актуальні проблеми, які пов'язані з дослідженням кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань на глобальному, регіональному та локальному рівнях. Це дозволить науковцям більш якісно та об'єктивно розуміти сучасні геодинамічні процеси.

## **2. Наукова новизна одержаних результатів**

У дисертаційному дослідженні автором розроблено нові та удосконалені наявні методики та алгоритми, які дають змогу підвищити якість процесу 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.
- 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.

На підставі ґрунтовного опрацювання роботи, підтверджено отримані наукові результати у повному обсязі. Важливо зазначити, що значна кількість з таких результатів отримані вперше, а саме: розроблено методику та визначено динамічні параметри основних тектонічних плит на основі даних ГНСС-вимірювань, інформації про товщину та розподіл густини шарів земної кори, визначено просторово-часові взаємозв'язки між розподілом ротаційних і динамічних параметрів основних тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі, а також усі запропоновані автором моделі.

Вважаю, що дисертаційне дослідження має наукову новизну та сприяє розвитку сучасних напрямків науки і техніки.

### **3. *Відповідність дисертаційного дослідження науковим планам та темам***

Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку 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».

Дисертаційне дослідження пов'язане з імплементацією нормативно-правових актів України, а саме: 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» У зв'язку з цим важливо відзначити, що автор роботи брав участь у реалізації науково-дослідних робіт у рамках «Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки».

Великий обсяг експериментальних досліджень, які в подальшому слугували вхідними даними для виконання дисертаційних досліджень були отримані автором в рамках багатьох науково-технічних роботах, таких як: Українські антарктичні експедиції у 2018–2019 роках на антарктичній станції «Академік Вернадський»; науково-дослідні роботи з визначення горизонтальних переміщень пунктів опорної геодезичної «Дністровської ГАЕС»

### **4. *Аналіз відповідності змісту та структури роботи встановленим вимогам, оцінка рівня завершеності дослідження***

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 метод найменших квадратів, запропоновано вдосконалити методику визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит на основі опрацювання часових рядів щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій.

Для забезпечення можливості максимального відтворення дослідження в якості вхідних даних автор використовував інформацію з вільно доступних джерел Невадській геодезичній лабораторії.

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.

Структурно запропонована методика передбачає 5 основних етапів:

1. Трансформація даних у внутрішній формат. Дані 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. 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 системи лінійних рівнянь, в яких кожному компоненту 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 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. Визначення ротаційних параметрів. Для визначення ротаційних параметрів використовувався математичний апарат, який ґрунтується на взаємозв'язку між компонентами швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій та ротаційних параметрів тектонічних плит:

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. 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).

Використовуючи підготовлені вхідні дані, а також запропоновану удосконалену методику, визначено складові векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій, розташованих на досліджуваних плитах, за період 2002–2021 років у системі ITRF2014/IGS14.

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.

Визначені автором ротаційні параметри 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 вимірних величин. Використовуючи функціональні залежності, оцінено точність визначення горизонтальних рухів тектонічних плит із використанням отриманої моделі

Оскільки розташування перманентних ГНСС-станцій у межах тектонічних плит не є рівномірним, тож оцінювання точності виконано на основі регулярної сітки розміром  $1^\circ$  на  $1^\circ$ . Такий підхід дає змогу оцінити точність використання моделі рівномірно для всієї плити, навіть якщо там немає перманентних ГНСС-станцій. Загалом можна стверджувати, що використання визначених сучасних ротаційних параметрів забезпечить досить високу точність визначення горизонтальних рухів.

З метою оцінювання достовірності визначених сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит 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.

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.

Аналізуючи представлені результати, 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» для визначення динамічних параметрів тектонічних плит (моментів інерції, моментів імпульсу та кінетичних енергій) пропонується використовувати часові ряди щоденних розв'язків перманентних ГНСС-станцій. 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, що в свою чергу є вхідними даними запропонованої методики. Структурно запропонована методика передбачає 4 основних етапи:

1. Трансформація даних у внутрішній формат. Як вже 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. до опрацювання. Сама підготовка передбачає обрізку моделі 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. 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.

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 між компонентами швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій та ротаційних параметрів тектонічної плити.

Після визначення ротаційних параметрів виконувався розрахунок найкоротшої відстані  $r_i$  від осі обертання плити до центру кожної комірки в геоцентричній системі координат  $(X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci})$ . 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.

4. Визначення моменту інерції, моменту імпульсу та кінетичної енергії тектонічних плит. Для визначення цих параметрів використано методи теоретичної механіки.

Використовуючи запропоновану методику, а також значення сучасних ротаційних параметрів, встановлених у попередньому розділі, визначено сучасні значення моментів інерції, моментів імпульсу, а також кінетичні енергії основних тектонічних плит. Отримані значення є досить не однорідними. Виконано окремі детальні аналізи кожного параметра по кожній плиті.

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, Північно-американської, Євразійської, Африканської, Антарктичної, Австралійської та Південно-американської), 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. Така точність безпосередньо залежить від якості даних для кожного року.

Автором 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  $0^{\circ}$ – $45^{\circ}$ ), натомість найнижчою динамікою характеризується зміна координат ротаційного полюса Австралійської тектонічної плити (в межах  $0^{\circ}$ – $5^{\circ}$ ).

На основі проведеного кореляційного аналізу, побудована та проаналізована діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних координат ротаційних полюсів великих тектонічних плит. Аналізуючи дані дослідження, зроблено



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 обертовим 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 автором вирішено оцінити можливий взаємозв'язок такої динаміки з нерівномірністю обертання Землі.

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 побудована та проаналізована діаграма взаємозв'язків між змінами середньорічних значень кутової швидкості обертання великих тектонічних плит та нерівномірністю обертання Землі. Аналізуючи діаграму, автор зробив 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. Аналізуючи дані дослідження автор зробив висновок, 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 Автор оперував поняттям умовного моменту імпульсу Землі, який враховує тільки зміну кутової швидкості обертання Землі.

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 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. Аналізуючи дані дослідження, Автор зробив 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 Автор оперує поняттям умовної кінетичної енергії Землі, яка враховує тільки зміну кутової швидкості обертання Землі.

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. Аналізуючи дані дослідження,

Автором зроблено 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.

У п'ятому розділі «Удосконалення методики визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань» використовуючи метод найменших квадратів та тензорний аналіз, запропоновано удосконалену методику визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань. 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. 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  $3\sigma$ .

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, яке враховує тільки лінійну



(трендову) складову руху. Відтак на даному етапі використовували складнішу модель, яка додатково враховує сезонність рухів. Системи рівнянь 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 (тріангуляція Делоне), тому на цьому етапі удосконаленої методики мережу перманентних ГНСС-станцій розбивали на мережу трикутників з вершинами в цих станціях.

6. 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.

Автором виявлено різні значення швидкостей горизонтальних зміщень перманентних ГНСС-станцій у межах Африканської системи тектонічних плит від 18.8 до 47.8 мм/рік у північно-східному напрямку. Зокрема, південно-західна частина Африканської плити має менші швидкості горизонтальних зміщень у

порівнянні з північно-східною частиною. Це підтверджує попередні дослідження та вказує на наявність регіональних варіацій у динаміці тектонічних рухів.

Дисертаційним дослідженням підтверджено, що Африканська система тектонічних плит характеризується досить складною динамікою деформаційних процесів, яка продемонстрована конвергентними та дивергентними процесами. Межа Африканської та Аравійської плит є дивергентною вздовж Червоного моря, що спричиняє його поглиблення.

Однак північна частина цієї межі вздовж Синайського півострова і Середземного моря характеризується дещо іншим напрямком дивергентних процесів. Дивергенція Аравійської та Сомалійської плит збільшується зі сходу на захід уздовж Аденської затоки. Північна частина межі Африканської та Сомалійської плит також характеризується дивергентними процесами. Такі процеси призводять до утворення озер Рифтової долини. 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, а в лютому-квітні 2019 року автором додатково закладено ще 6 пунктів геодинамічного полігону.

Аналізуючи дослідження, Автор зробив 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

Аналізуючи просторовий розподіл поля швидкостей вертикальних зміщень 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 (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.

Провівши комплексний аналіз представлених результатів, а також співставивши їх із даними GMRT (Global Multi-Resolution Topography synthesis), можна припустити наявність ще одного розривного порушення, яке збігається з

напрямок 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. Визначені напруження в блоках дають змогу припустити природу кінематичного типу розлому протоки Пенола – каналу Лемера

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. 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.

Вектори горизонтальних зміщень пунктів робочої мережі 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. м<sup>3</sup> (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 2011pp.) та



після (жовтень 2012 – жовтень 2018рр.) заповнення Дністровського верхнього водосховища. Значення швидкостей горизонтальних зміщень використано для побудови просторового розподілу поля швидкостей дилатації земної поверхні досліджуваного району до та після заповнення Дністровського верхнього водосховища.

У результаті аналізу розподілу швидкостей дилатації 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 підсипання.

Таким чином, ознайомившись детально з дисертаційним дослідженням, хочу відмітити, що результати апробації підтвердили ефективність розробленої моделі використання ГНСС-вимірювань при дослідженні геодинамічних процесів. Отримані дані дозволили розробити конкретні рекомендації для кожної з досліджуваних методик щодо розроблення нових та удосконалення наявних методів диференціації кінематики тектонічних структур. Практична реалізація моделі продемонструвала її ефективність та можливість застосування в різних структурах тектоніки літосферних плит. Це у повному обсязі свідчить про актуальність та наукову новизну проведеного дослідження.

За результатами виконання дослідження зроблені висновки та запропоновані рекомендації. Вони у повній мірі відображають завдання та зміст самої роботи.

## *5. Оцінка практичної цінності результатів дисертаційного дослідження*

Автором дисертаційного дослідження визначені такі складові практичної цінності отриманих результатів:

- 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 ОПШ «Космічна геодезія» спеціальності 193 Геодезія та землеустрій.

Загалом, запропоновані наукові обґрунтування пройшли верифікацію, як під час обговорення на наукових конференціях, так і на практиці при визначенні геодинамічних характеристик територій Земної поверхні. Повнота та зміст доповідей автора дисертаційного дослідження, які обговорювалися на національних та міжнародних наукових зібраннях, кількість і якість наукових публікацій, а також зміст апробацій результатів дослідження підтверджують достовірність і його практичну цінність.

#### ***6. Відповідність паспорту спеціальності та оцінювання аспектів забезпечення академічної доброчесності***

Дисертаційна робота Савчина Ігора Романовича на тему «Диференціація кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань» відповідає паспорту спеціальності 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія та спрямована на вирішення науково-прикладної проблеми розроблення нових та удосконалення наявних методів диференціації кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань. Назва дисертації у повній мірі відповідає змісту досліджень. Матеріали кандидатської дисертації не були використані під час виконання дисертаційного дослідження.

Вважаю підтвердженням високий рівень унікальності дисертаційної роботи.

#### ***7. Оцінка особистого внеску здобувача***

До усіх наукових праць здобувача є вільний доступ через Google Академію і наявний профіль здобувача. Заявлені наукові праці мають цитування, що є одним з підтверджень їх наукової пізнаваності. Важливо зауважити, що наукові праці у

повній мірі розкривають основні положення та наукові результати дисертаційного дослідження. Підтверджено наявність публікацій, що індексується наукометричною базою Scopus.

Окрім публікацій, що індексуються у міжнародних наукометричних базах, наявна достатня кількість статей у фахових виданнях України категорії Б за спеціальністю. Дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, про що свідчить наявність тез і відповідних матеріалів.

#### ***8. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації***

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, відповідають вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук. Визначено високий рівень достовірності отриманих наукових результатів, які підтверджуються на практиці, наявні висновки та пропозиції, що відповідають змісту та завданням дисертаційного дослідження. Матеріал дослідження подається структуровано і логічно, розділи роботи є послідовно описаними і такими, що забезпечують у повній мірі реалізації мети дослідження.

Здобувач використав значну кількість нормативно-правових та нормативно-технічних актів України, які повністю відповідають науковій предметній області, а також наукових публікацій сучасних вітчизняних та закордонних визнаних фахівців. Вважаю, що загалом, дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка повністю відповідає галузевому спрямуванню спеціальності 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія.

Разом з тим, у роботі наявні суперечливі питання і неточності, на які варто звернути увагу:

1. Розділ 4, стор. 107. В роботі запропоновано використовувати коефіцієнт Пірсона для оцінки взаємозв'язків між зміною середньорічних значень. Цей коефіцієнт може бути нульовим для залежних змінних. Наближення його значення до нуля свідчить про відсутність лінійного зв'язку, але не є доказом



відсутності статистичного зв'язку взагалі. Чи розглядав автор інші методи пошуку зв'язку між змінними? Наприклад метод канонічної кореляції, який застосовують для визначення взаємозв'язку між двома наборами змінних або лінійними комбінаціями змінних чи метод рангової кореляції Кендалла.

2. Розділ 5, стор. 131. В запропонованому автором алгоритмі удосконаленої методики визначення деформаційних параметрів на основі даних ГНСС-вимірювань використано алгоритм Делоне для обчислення центрів елементарних фігур і відповідних параметрів деформації. Враховуючи різну щільність ГНСС станцій буде отримано трикутники з суттєво різною довжиною сторін. Виникає питання, чи не призводить це до збільшення помилок визначення деформації для більших площин, неоднорідності визначення деформації? Чи розглядалась можливість додаткової кластеризації станцій ГНСС, наприклад методом k-середніх, для подальшого визначення деформації кластеру для контролю чи покращення неоднорідності визначених параметрів деформації?
3. Пункт 5.2.2, стор. 142. При визначенні деформаційних параметрів Антарктичної тектонічної плити на основі вдосконаленої методики на рисунку 5.8 не видно розподілу площ на трикутники Делоне, читабельність самих параметрів деформації дуже слабка, деталізовану інформацію в додатках не представлено. Аналогічна ситуація для Африканської системи тектонічних плит (рис.5.14).
4. На рис. 5.16 просторового розподілу поля швидкостей обертання Африканської системи тектонічних плит повороти Аравійської та Сомалійської тектонічних плит мають протилежні напрямки, що повинно бути причиною збільшення деформації стиснення на межі цих плит. Але на рис. 5.17. з просторовим розподілом осей деформацій по лінії цих плит зображено деформацію розширення. Чим можна пояснити такі результати?
5. Розділ 5.1. При визначенні деформаційних параметрів автор нехтує вертикальними деформаціями і досліджує лише планові зміщення. Цікаво дізнатись, чому Автор вирішив не враховувати вертикальну динаміку? Яка основна причина даного підходу? Якщо ми розглядаємо всі види тектоніки

літосферних плит, то не слід забувати, наприклад, про зони субдукції, де океанічна кора заходить під континентальну кору і, таким чином, створюються гори та вулкани. Або конвергентні границі, коли плити зіштовхуються одна з одною і створюються «зморшки» кори. Тим більш, Автор в подальших розділах описує ці процеси.

6. Анотація, стор. 2. Як методика може забезпечувати покращення точності у порівнянні з реалізацією системи координат ITRF20?

Зазначені зауваження носять дискусійний характер і загалом не впливають на позитивні враження від дисертаційного дослідження. З огляду на актуальність, наукову новизну, практичну цінність та важливість одержаних автором наукових результатів, системність сформульованих положень і висновків вважаю, що дисертаційна робота Савчина Ігора Романовича на тему «Диференціація кінематики тектонічних структур за даними ГНСС-вимірювань» є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну наукову проблему розроблення нових та удосконалення наявних методів диференціації кінематики тектонічних структур за даними проведених та вільно доступних ГНСС-вимірювань, що має суттєве значення у галузі геодезії та геодинаміки.

На підставі вищезазначеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота Савчина Ігора Романовича відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук (пункти 6, 7, 8 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17.11.2021 року) а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01– геодезія, фотограмметрія та картографія.

Офіційний опонент:  
Професор кафедри Інженерної геодезії  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури  
доктор технічних наук, професор

Учений секретар КНУБА



  
Андрій АННЕНКОВ

  
Микола КЛИМЕНКО