

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

РЕФЕРАТ

наукової праці на здобуття щорічної премії
Президента України для молодих вчених

ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Претендент – **ІЩЕНКО Марина Вікторівна**, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук відділу фізики зір та галактик Головної астрономічної обсерваторії НАН України

 Іщенко М.В.

Актуальність роботи. На сучасному етапі розвитку науки в світі глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) використовуються не тільки для потреб навігації, але і для вирішення широкого кола наукових завдань, зокрема, в геодезії, геодинаміці, картографії, кадастрі, метеорології тощо. Цей метод не залежить від багатьох зовнішніх чинників, таких як погодні умови, і забезпечує високий рівень точності супутникових спостережень на перманентних ГНСС-станціях. ГНСС-спостереження, накопичені роками, з сучасними моделями та алгоритмами, що використовуються при обробці, дозволяють отримувати якісні однорідні високоточні координатні часові ряди. На основі таких координатних рядів стає можливим оцінити вектори швидкості для кожної ГНСС-станції. Результати, що накопичені протягом тривалого періоду часу, можуть бути використані для геодинамічних досліджень, постсейсмічної деформації після землетрусу, осідання ґрунту, деформації греблі тощо.

Як відомо, процеси з деформації земної поверхні в Україні вивчаються з використанням спеціалізованого обладнання локально і загалом орієнтовані на територію Прикарпаття та Закарпаття, тобто регіон Карпат. Іншим прикладом

служує дослідження територій, де знаходяться об'єкти спеціального призначення, такі як греблі, атомні станції тощо.

Мета роботи полягає:

- 1) у розрахуванні параметрів деформації земної поверхні, з використанням однорідних координатних рядів та швидкостей зміщень постійнодіючих ГНСС-станцій для території України, що були отримані в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАНУ;
- 2) у визначенні границь територій за однаковими деформаційними проявами з використанням лінеаментних зон;
- 3) у перевірці отриманих результатів в ГАО НАНУ з кумулятивним розв'язком, отриманим для території Центральної Європи в рамках проєкту «EPN Densification», Європейської перманентної ГНСС-мережі;
- 4) у проведенні порівняльного аналізу отриманих параметрів деформації земної поверхні з геологічними та геофізичними даними, що визначені для території України, зокрема з висотами «регіонального» і «локального» квазігеоїда УГК2012, пліоцен-четвертинними вертикальними рухами (ПВЧР), глибиною границі Мохоровича та розподілом сейсмічних хвиль.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розрахуванні параметрів деформації земної поверхні для території України, що були виконані на основі високоточних координат та векторів швидкостей постійнодіючих ГНСС-станцій, визначених в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАНУ.

В перше для території України отримано наступне.

1. Параметри деформації земної кори розраховано за даними ГНСС-спостережень з 108 постійнодіючих станцій з мінімальним періодом спостережень у три роки (максимальний період для деяких станцій склав 20 років). Перший параметр характеризуються *еліпсами викривлення*, тобто проявами розширення і/або стискання, розрахованими вздовж вісей еліпсів. Параметр *обертання* демонструє поступально-обертальні рухи, які визначається кутом між головними вісями недеформованого еліпса (коло) та

деформованим еліпсом.

2. В межах території України за допомогою лінеаментних зон та розломів виділено чотири великих сучасних морфоструктури (геоблоки): Північно-західний (I) і Північно-східний (III), що обертаються за годинниковою стрілкою та Південно-західний (II) і Південно-східний (IV), які мають обертання проти годинникової стрілки. Прояв процесу стиснення-розширення виокремлено в дві зони: зона суцільного розширення земної поверхні, що домінує по обом осям еліпсу (V) та зона змішаного типу (VI), де по одній вісі відбувається розширення, по другій – стискання, див. рисунок 2.1 та 2.2.

В перше проаналізовано за даними ГНСС-спостережень наступне.

1. У першому наближенні областям переважаючого розширення земної поверхні відповідають зони новітніх тектонічних підняттяв (Волино-Подільська височина, Приазовська височина), а для областей змішаного типу деформації – тектонічні опускання (Поліська і Придніпровська низовини).

2. Поступово-обертальні рухи виокремлених морфоструктур найбільш чітко прослідковуються у зіставленні з «локальними» аномаліями висот, а саме для II та IV (від 23 до +7 см), де спостерігаються позитивні величини значень висоти. Для морфоструктур з обертанням за годинниковою стрілкою (I та III) спостерігаються величини по висоті від +5 до -10 см. Порівняльний аналіз висот «регіонального» квазігеоїда УГК2012 з параметром обертання показав не значну кореляцію: лише для II морфоструктури є відповідність з максимальними величинами висот (33-34 м).

Еліпси викривлення мають більш чітку кореляцію з «регіональним» квазігеоїдом, ніж з «локальним», особливо для області V, де прослідковуються найбільші величини (33-34 м), що відповідають області розширення по обом осям еліпсів. У той же час кореляції з областями V і VI у порівнянні з «локальними» величинами УГК2012 практично не простежуються, що говорить про зв'язок геоїда та деформаційних параметрів саме з глибинними проявами, що відображають структурно-густинні неоднорідності.

3. Співзіставлення з амплітудами ПВЧР з параметром обертання демонструють,

що для однакових морфоструктур за типом обертання спостерігаються в областях, де амплітуда рухів досягає 100 м і більше (II та IV), а морфоструктурам I і III відповідають мінімальні значення амплітуди висоти, відповідно (до 50 м). Щодо областей V та VI, то тут не має чіткої кореляції стиснення-розширення земної поверхні з амплітудою висоти.

4. Додатково було проведено порівняння параметрів деформації з поздовжніми сейсмічними хвилями на глибині 50 км. Для морфоструктур II та IV, що обертаються проти годинникової стрілки, характерні більш низькі швидкості сейсмічних хвиль (до 8,01 км/с), а для морфоструктур I та III – підвищені значення (до 8,11 км/с) відповідно. Крім того, аналізуючи глибинну залягання поверхні Мохоровича, було визначено, що для III і частково для I морфоструктури середня товщина поверхні Землі має невеликі відхилення (40-45 км). Для морфоструктури I поряд з більш тонкою корою в західній частині відбувається різке збільшення в бік північної частини. Центральна частина морфоструктури III характеризується різким зменшенням товщини кори до 35 км. З переходом в у морфоструктуру IV товщина збільшується до 45 і 50 км відповідно. Помітних взаємозв'язків з поверхнею Мохоровича для областей V та VI не знайдено.

Практичне значення результатів полягає в отриманні параметрів деформації земної поверхні одразу для всієї території України з використанням ГНСС-станцій, які не потребують додаткових матеріальних та фінансових витрат на проведення відповідної наукової кампанії. Таким чином було отримано загальне розуміння деформаційних процесів одразу для всієї території країни.

Отримані результати були співзіставлені з геологічними та геофізичними даними і продемонстрували кореляцію та взаємозв'язки між сучасними рухами земної кори з параметрами деформації, отриманими зі ГНСС-спостережень, які якомога ближче за часом і передують сучасним рухам земної поверхні. Таким чином, використання ГНСС-станцій для проведення моніторингу геодинамічної активності, є актуальним та достовірним методом, який не вимагає проведення спеціальних кампаній спостережень.

Основний зміст роботи. З 2012 р на території України різко збільшується кількість перманентних ГНСС-станцій і на 2019 р. їх налічувало понад 200. Така кількість станцій дозволяє створити досить густу мережу.

Після аналізу часових рядів та тривалості спостережень було відібрано 108 станцій, вісім з яких знаходяться поблизу кордону з Україною. Точність координатного розв'язку ГАО склала 1,69 мм і 1,4 мм для північної та східної компонент. Середня величина планової (горизонтальної) компоненти векторів швидкості склала 2,58 см/рік і представлена на рисунку 1.1.

Для перевірки отриманих величин використано результати розв'язку з оцінки векторів для території Європи (включаючи Україну), отриманих в рамках проєкту «EPN Densification», рисунок 1.1. Проєкт з постійного ущільнення мережі EPN – це спільна робота 26 європейських центрів аналізу ГНСС-даних, що забезпечує серію щоденних або щотижневих оцінок положення ГНСС-станцій національних та регіональних мереж, щоб об'єднати їх в один гомогенізований набір координат і швидкостей руху перманентних станцій. Порівнюючи величини і напрямки руху з обох розв'язків, можна бачити, що напрями векторів руху відповідають глобальному напрямку руху Євразійської літосферної плити, визначні в системі відліку IGB08 (координатна реалізація Міжнародної земної системи координат 2014 року).

Таким чином, щільність розташування ГНСС-станцій і точність координатного розв'язку Центру аналізу ГНСС-даних ГАО дозволили провести розрахунок параметрів деформації земної поверхні для території України.

Розрахунок деформації було виконано в два етапи з використанням програмного забезпечення «GeoStrain»:

- 1) виключення величини руху Євразійської літосферної плити з величин зміщення ГНСС-станції для переходу у локальні значення та
- 2) розрахунок тензорного навантаження (деформації).

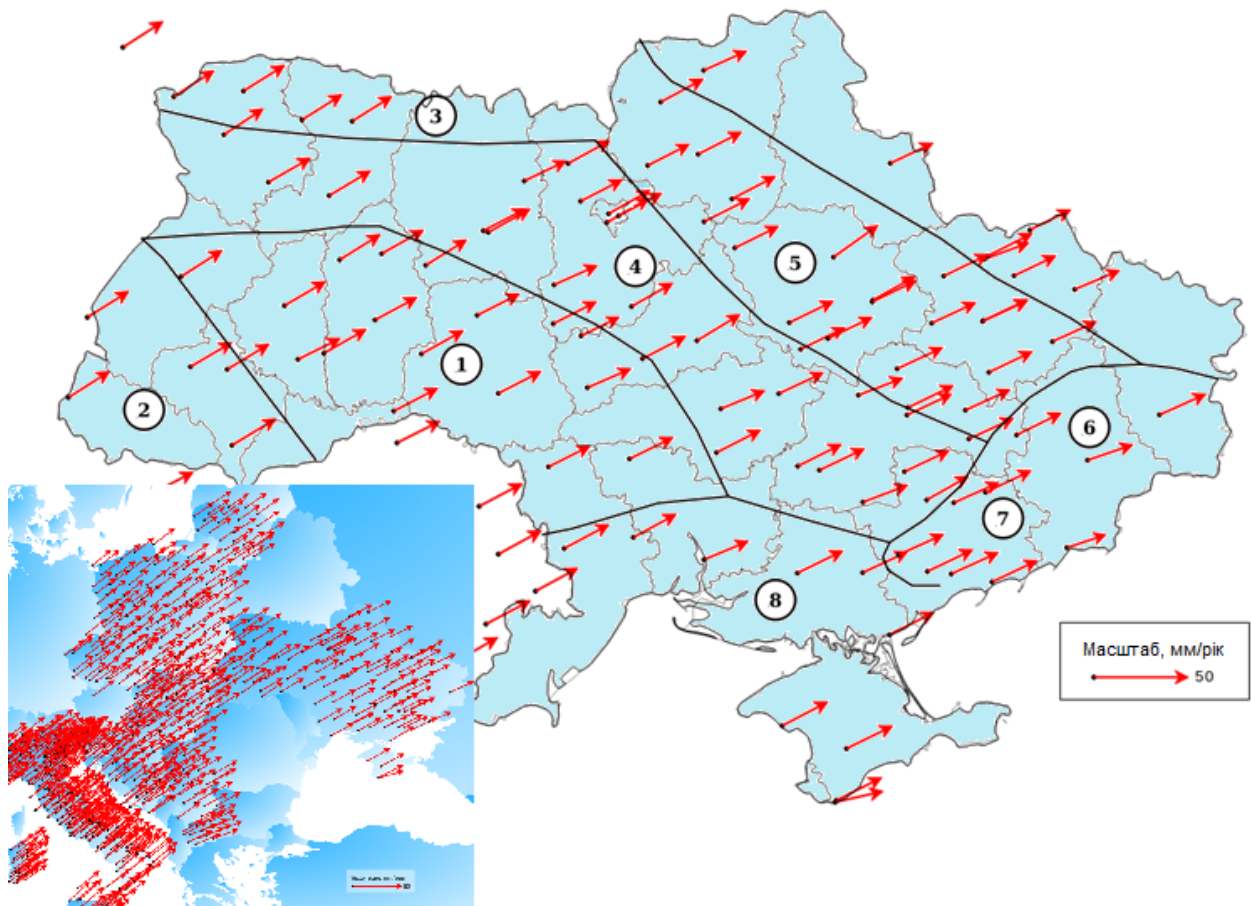


Рисунок 1.1. – Планова компонента векторів зміщень ГНСС-станцій. На карті знизу ліворуч представлено кумулятивний розв’язок для центральної Європи, отриманий в рамках проекту «EPN Densification» включно з територією України (система відліку IGB08, епоха 2014.1). На центральній картосхемі представлено розв’язок, отриманий в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАНУ (система відліку IGB08, епоха 2005.0). Цифрами позначено географічне районування території: 1 – Волинсько-Подільська височина, 2 – Карпати, 3 – Поліська низовина, 4 – Придніпровська височина, 5 – Придніпровська низовина, 6 – Донецький кряж, 7 – Приазовська височина, 8 – Причорноморська низовина. Середнє значення векторів зміщення для території України складає 2,58 см/рік. Чорні точки – розташування перманентних ГНСС-станцій. Червоні стрілки – вектори руху ГНСС-станцій.

Загалом, деформацію можна охарактеризувати, як різниця між деяким початковим і кінцевим станом, тобто області кори змінюють свою форму – рухаються як блок («зміщення») і обертаються як блок («обертання»). Величина деформації, що характеризує прояв стиснення і/або розширення земної

поверхні, представлена еліпсом викривлення. Значення розширення і стиснення представлені головною і вторинною піввісями еліпса. Параметр обертання визначається кутом між великими піввісями недеформованим еліпсом (коло) і деформованим еліпсом та демонструє поступально-обертальні рухи, які можуть бути викликані їх реакцією (відповіддю) на нерівномірне обертання Землі.

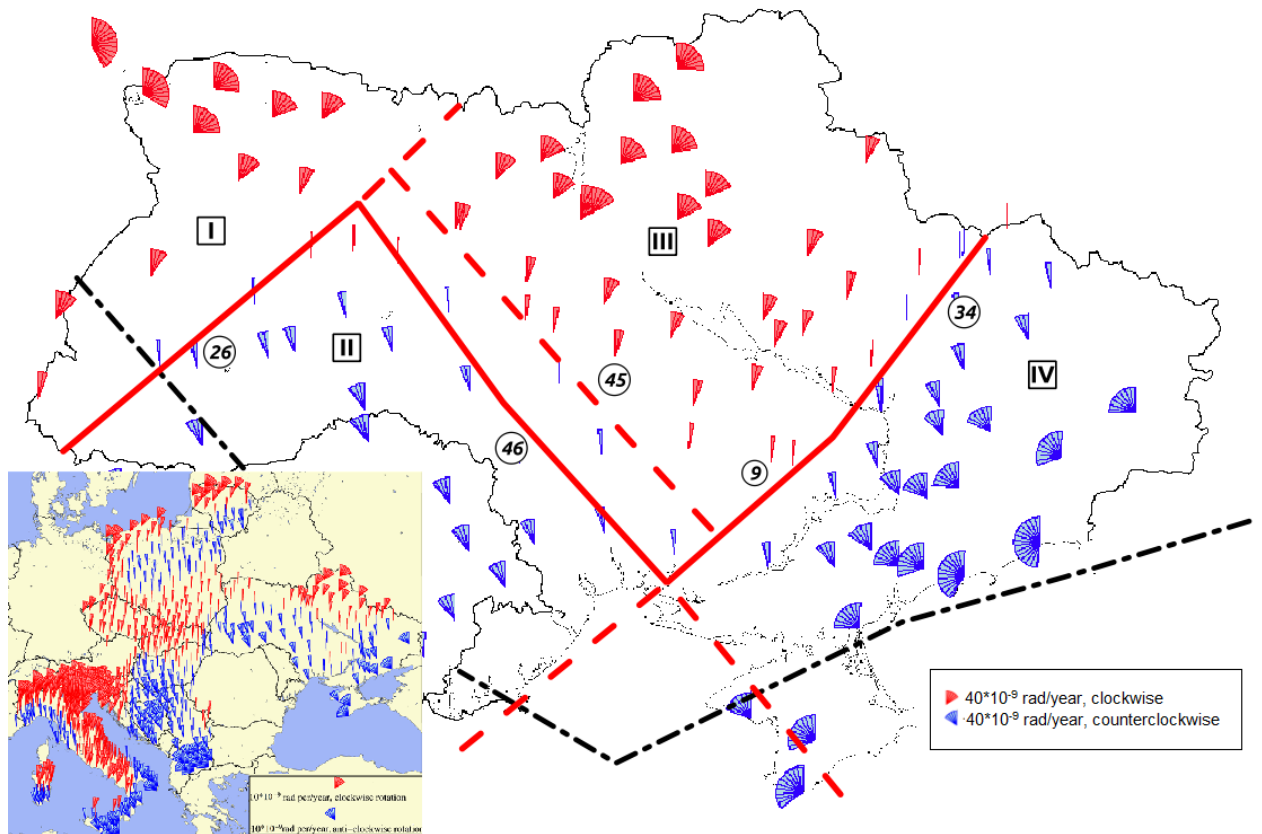


Рисунок 2.1 – Параметри деформації поверхні земної кори: обертання. Сині позначки – обертання проти годинникової стрілки, червоні – за годинниковою. Знизу ліворуч наведено розв’язок «EPN Densification». Червона суцільна лінія – межа поділу морфоструктур з різними напрямками обертання, пунктирна – можливе продовження або інший варіант проведення межі. Цифри в кружках – номери лінеаметнів (збережено авторську нумерацію В.Г. Верховцева). Пунктирна лінія з крапками – межа східної Європейської платформи. Римські цифри – номери морфоструктур.

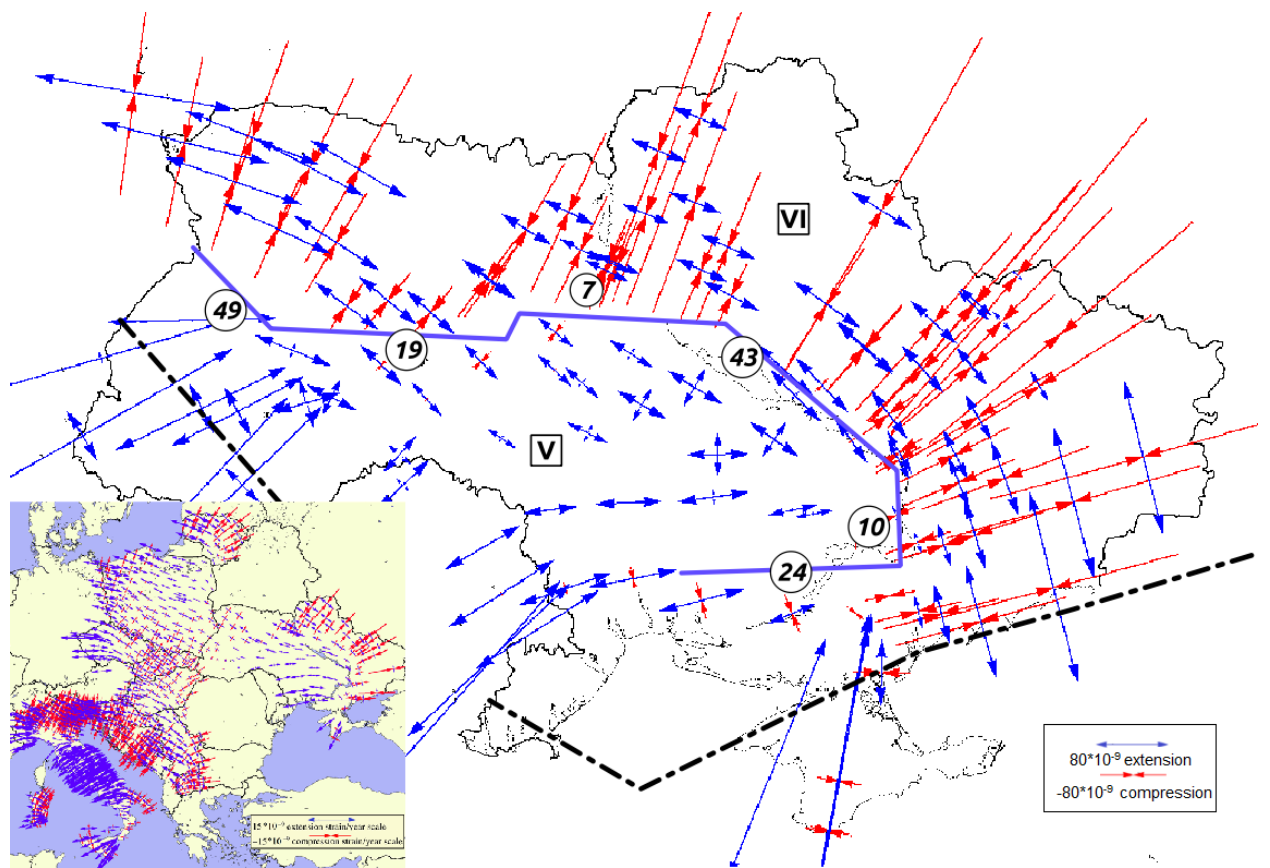


Рисунок 2.2 – Параметри деформації поверхні земної кори: еліпси викривлення. Сині стрілки – розширення, червоні – стискання та напрямки їх максимального та мінімального прояву деформації. Знизу ліворуч наведено розв’язок «EPN Densification». Синя суцільна лінія – межа областей V (відбувається розширення по обом осям) та VI (змішаний тип) проведена по лінеamentним зонам. Інші умовні позначення відповідають рисунку 2.1.

Відповідні мінімальні, максимальні і середні величини параметрів деформації (величина безрозмірна) по вісях еліпсів викривлення склали відповідні величини:

- велика піввісь: від $-23,39 \cdot 10^{-9}$ до $5,9 \cdot 10^{-9}$,
- мала піввісь: від $-7,5 \cdot 10^{-9}$ до $197,3 \cdot 10^{-9}$,
- обертання за годинниковою стрілкою: від $2,9 \cdot 10^{-9}$ до $96,9 \cdot 10^{-9}$,
- обертання проти годинникової стрілки: від $-2,0 \cdot 10^{-9}$ до $-117,0 \cdot 10^{-9}$.

Для перевірки отриманих параметрів деформації, розрахованих за результатами координатного розв’язку, отриманого в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО, були використані отримані параметри деформації з розв’язку «EPN Densification». Розрахунок параметрів було виконано в тій самій послідовності, що і для

розв'язку ГАО. Як можна бачити на рисунках 2.1 та 2.2, загальна схема формування морфоструктур та типів проявів деформацій співпадає з результатами з «EPN Densification» та Центру аналізу ГНСС-даних ГАО. Незначні відмінності на картосхемах пояснюються різною конфігурацією та масштабом карти.

Висновки. За отриманими параметрами деформації земної поверхні з ГНСС-спостережень на якісному рівні виконано зіставлення просторових особливостей параметрів розширення-стискання та обертання за- чи проти годинникової стрілки. Місцезнаходження областей переважного розширення і стиснення земної поверхні і конфігурація зони їх зчленування, а також напрямки осей, їх максимальних і мінімальних величин, свідчать про як мінімум три фактори, що їх зумовлюють.

1. Наявність новітніх зон тектонічних піднятів (Волинсько-Подільська височина, Приазовська височина і Донецький кряж) і опускань (Поліська і Придніпровська низовини). У першому наближенні області піднятів відповідають максимальним амплітудам ПВЧР, «локальному» квазігеоїду, та частково, «регіональному» і характеризуються переважним розширенням земної поверхні.

2. На цей тип рухів накладаються сучасні рухи, пов'язані з тектонічним рухом Євразійської плити в північно-східному напрямку.

3. Можливі рухи широтного напрямку, обумовлені нерівномірним обертанням Землі. Останні два чинники є глобально-регіональними відносно першого. Мабуть, взаємодією цих трьох складових можна пояснити амплітуди і напрямки переміщень земної поверхні, напрямків осей розтягування-стиснення як у межах самих структур, так і в області їх зчленування. Ці три сучасні сили задовільно пояснюють і ліво- та правосторонні обертання виділених чотирьох морфоструктур: Північно-західна (I) і Північно-східна (III), що обертаються за годинниковою стрілкою та Південно-західна (II) і Південно-східна (IV), які мають обертання проти годинникової стрілки. Таке їх обертання добре пояснюється з позицій вихрової гідродинаміки, відповідно до рівнянь якої

наявність вертикального градієнта густини в гравітаційному полі Землі спричиняє обертання речовини середовища в горизонтальній площині. Причому у разі підйому речовини земної кори формується його лінза з обертанням проти годинникової стрілки, а у випадку занурення – за годинниковою стрілкою. Все це підтверджується в нашому випадку наявністю густинної неоднорідності земної кори, що виявляється більшою чи меншою мірою аномаліями гравітаційного поля і геоїда, а також амплітудами ПЧВР земної кори.

На якісному рівні запропоновано механізм взаємозв'язку сучасних і новітніх рухів земної кори, а саме: наявність новітніх зон тектонічних підняття і опускань з відповідними напругами і переміщеннями, на які накладаються сучасні напруги (і відповідно переміщення), пов'язані з тектонічним рухом Євразійської плити в північно-східному напрямку і нерівномірним обертанням Землі.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідались, обговорювались та отримали схвалення на міжнародних наукових конференціях. В повному обсязі результати роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на наукових семінарах відділу астрометрії та космічної геодинаміки ГАО НАН України, кафедри аерокосмічної геодезії Національного авіаційного університету, об'єднаному семінарі відділів сейсмічної небезпеки і регіональних проблем геофізики Інституту геофізики НАНУ ім. Суботіна та кафедрі геологічних наук Падуанського університету.

Публікації. Кількість публікацій за роботою: 8 статей (5 – у англійськомовних журналах з імпаکت-фактором), 14 тез доповідей. Загальна кількість посилань на публікації автора/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 9/2, Scopus – 8/2, Google Scholar – 26/3.

Загальна кількість публікацій: 15 статей (7 – у англійськомовних журналах з імпаکت-фактором), 18 тез доповідей. Загальна кількість посилань на публікації автора/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 9/2, Scopus – 8/2, Google Scholar – 35/3.