

УДК 551.24+528.22

Корнилій ТРЕТЯК^{1a}, Іван БРУСАК^{1b*}, Володимир БАБЧЕНКО^{1c}

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>; ^{1b*} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>, ivan.v.brusak@lpnu.ua; ^{1c} <https://orcid.org/0009-0005-3219-4959>

<https://doi.org/10.23939/jgd2024.02.056>

СУЧАСНІ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ КОРИ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ГНСС-МЕРЕЖ GEOTERRACE TA SYSTEM.NET

У роботі проаналізовано сучасні тенденції горизонтальних та вертикальних зміщень території України за даними ГНСС-мереж GeoTerrace та System.Net. Побудовано відповідні карти рухів з виділенням зон деформацій верхнього шару земної кори. Об'єктом дослідження є горизонтальні та вертикальні деформації верхнього шару земної кори, мета – виявлення та аналіз деформаційних зон на території України. Вихідними даними є горизонтальні та вертикальні швидкості зміщень ГНСС-станцій з 2018 до 2023 рр. мережі GeoTerrace та у 2021–2023 рр. мережі System.Net, тектонічна карта території з Національного атласу України та описові матеріали. Методика передбачає порівняння та аналіз сучасних деформацій земної кори регіону з його відомою тектонічною структурою. У результаті побудовано нові карти сучасних горизонтальних швидкостей зміщень верхнього шару земної кори України як єдиного регіону, а також вертикальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій. Встановлено, що сучасні горизонтальні рухи території України складні та співвідносяться з відомою тектонічною будовою. Їх також порівняно з регіональними модельними значеннями, обчисленими на основі моделі ITRF-2020. Більшість ГНСС-станцій зазнають висотних просідань, імовірно, в зв'язку з денудаційними процесами. У дослідженні описано сучасні рухи земної кори, але для детальної інтерпретації необхідно використати додаткові дані спеціалістів із наук про Землю. Визначені швидкості зміщень ГНСС-станцій зі збільшенням часового інтервалу спостережень дадуть можливість встановити особливості просторового розподілу руху земної кори на території України та в майбутньому створити відповідні регіональні геодинамічні моделі кожної тектонічної структури чи окремих регіонів та України загалом, які мають практичну цінність для розвитку точної навігації з використанням точного позиціонування за мережами активних ГНСС-станцій.

Ключові слова: сучасна геодинаміка, деформації земної кори, горизонтальні рухи земної кори, вертикальні рухи земної кори, швидкості зміщень ГНСС-станцій, ГНСС-мережа, ГНСС-мережа GeoTerrace, ГНСС-мережа SystemNet, Україна, Український щит, Карпати.

Вступ

Сьогодні поширеною практикою є оцінювання сучасних геодинамічних процесів на основі даних просторово-часових серій ГНСС-станцій. Цьому сприяє постійне зростання кількості перманентних ГНСС-станцій у світі, зокрема і в Україні. На вебсайті ГАО НАН України [Українська ГНСС мережа] останнє оновлення переліку українських ГНСС-станцій здійснено 10 листопада 2020 року. У списку зазначено 417 активних та 108 демонтованих українських перманентних ГНСС-станцій. На початку 2022 р. на території України налічували понад 450 одиниць перманентних ГНСС-станцій [Brusak et al., 2024]. Очевидно, що їх стало менше після повномасштабного вторгнення росії, проте у 2024 р. кількість станцій продовжує зростати.

ГНСС-станції України об'єднані в мережі станцій державної та приватної власності. На території України працюють такі ГНСС-мережі: Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО), Держгеокадастру України (УПМ ГНСС), ПрАТ “Систем Солюшнс” (Sys-

tem.NET), Національного університету “Львівська політехніка” (GeoTerrace), Навігаційно-геодезичного центру (НГЦ.net), Київського інституту земельних відносин (KyivPOS), Система координатно-часового забезпечення України (NET.Spacecenter), компанії TNT TPI (RTKHub Network), тощо.

Для цього дослідження використано дані мереж GeoTerrace та System.NET, оскільки вони доповнюють геометрію одна одної та разом охоплюють усю територію, підконтрольну владі України, окрім тимчасово окупованих територій.

Створення мережі GeoTerrace розпочалося у 2007 р. в Львівській області. Сьогодні функціонує 84 ГНСС станції, які формують рівномірну мережу, що охоплює 14 областей України. Також для доповнення мережі у розгляді використано станції, розташовані на території Польщі вздовж кордону з Україною, які є частиною польських мереж ASG EUPOS (<http://www.asgeupos.pl>) та TPI NET pro (<https://tpinet.pl>), з якими здійснюється обмін даними [Siejka, 2017]. Більшість ГНСС-станцій укомплектовані приймачами компаній Trimble та Leica. Управління мережею GeoTerrace

в режимі реального часу здійснюється за допомогою комплексного програмного забезпечення Sino GNSS CDC.NET в лабораторії Національного університету “Львівська політехніка”.

Створення мережі System.NET розпочалося в 2012 р. Сьогодні мережа обслуговує значну кількість станцій, в останні роки приблизно 300. У 2019 р. приватна мережа System.NET отримала статус геодезичної мережі спеціального призначення [Новікова та ін., 2020]. Більшість активних ГНСС-станцій мережі System.NET оснащені приймачами компанії Leica Geosystems. Управління мережею у режимі реального часу здійснюється за допомогою комплексного програмного забезпечення Leica Spider.

Основна мета створення мереж GeoTerrace та System.NET – надання користувачам у режимі реального часу диференційних поправок для точного визначення місцеположення, а також моніторинг просторових зміщень земної кори та стабільності великих інженерних об’єктів, таких як гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції та атомні електростанції, а також деформацій територій, що їх оточують. Крім того, зазначимо, що ці мережі забезпечують повну інтеграцію із мережами країн EUPOS (Польща, Словаччина, Угорщина, Румунія) та Молдови. Мережами GeoTerrace та System.NET керують окремі центри управління, де виконують постійні ГНСС-вимірювання за допомогою супутників систем GPS, GALILEO та BEIDOU.

Попередні дослідження геодинаміки територій України за ГНСС-даними

Горизонтальні та вертикальні швидкості зміщень ГНСС-станцій, розташованих на території України, разом із оцінкою деформацій земної поверхні досліджені у багатьох публікаціях впродовж останнього десятиліття. Спочатку дослідження проводили поруч зі станціями у межах Європи. Так, [Ishchenko, 2016] оцінює просторові рухи 12 українських станцій у 1997–2006 рр., [Висотенко, 2010] визначає швидкості зміни координат загалом 16 станцій, які діють постійно і пунктів УПМ ГНСС, які працюють періодично, за результатами спостережень 1995–2007 рр., [Третяк та Вовк, 2012] оцінюють горизонтальні швидкості зміщень шести українських станцій за 2000–2010 рр. Пізніше зі збільшенням кількості ГНСС-станцій такі дослідження здійснювали на території всієї України та окремих регіонів.

Геодинаміку окремих регіонів України за ГНСС-даними також окремо детально досліджували. [Marchenko et al., 2019] визначили горизонтальні деформації регіону заходу України за даними 26 ГНСС-станцій України та 11 близько розташованих станцій країн Європи довкола регіону за 2016–2019 рр. За даними 28 ГНСС-станцій Карпатського регіону за 2013–2020 рр. [Doskich, 2021] оцінює горизонтальні швидкості

зміщень у регіоні та виділяє дві активні зони розтягу (Рахів – Верховина та Сянок – Устрики – Долішні) та зону стиснення (Рахів – Хуст – Мукачеве). У роботі [Tretyak and Brusak, 2021] здійснено пошук геодинамічних аномалій у часових рядах ГНСС-станцій мережі GeoTerrace для встановлення короткотривалих вертикальних зміщень, спричинених неприпливним атмосферним навантаженням у 2019 р. [Brusak and Tretyak, 2020; 2021]. Розширеніший регіональний аналіз геодинаміки заходу України виконали [Tretyak and Brusak, 2022] за даними 48 ГНСС-станцій за 2018–2021 рр. мережі GeoTerrace. Виявлено горизонтальні та вертикальні деформації регіону водночас зі спробою інтерпретації цих деформаційних процесів за геофізичними та тектонічними даними. Придатність, зокрема ГНСС-станцій в Україні, для геодинамічних досліджень за допомогою опрацювання результатів методом PPP оцінено в роботі [Pelc-Mieczkowska, 2020]. У дослідженні [Doskich et al., 2023] використано дані 30 ГНСС-станцій, обчислені PPP-методом, за 2017–2020 рр., які автори вважають придатними для геодинамічних завдань, оскільки часові ряди координат підпорядковані нормальному закону розподілу. Більшість станцій розташовані у двох регіонах: Поділля та Київщина. Для них обчислені горизонтальні швидкості зміщень та стиск–розтяг території.

За результатами 120 ГНСС-станцій за чотири роки спостережень з 2013 до 2016 рр. [Savchuk and Doskich, 2017] виконали оцінку сучасних рухів ГНСС-станцій України загалом. Мережа ГНСС-станцій не є суцільною: фактично відсутні ГНСС-станції, придатні для геодинамічних досліджень, на півдні України в Одеській, Миколаївській та Херсонській областях та на півночі: в Чернігівській та Сумській областях. Хоча у роботі наведено зіставлення з тектонічною картою, проте через відсутність рівномірних даних ГНСС-станцій неможливо комплексно оцінити геодинаміку території України загалом.

Опрацювавши мережу з 202 перманентних ГНСС-станцій за 1997–2017 рр., [Ishchenko, 2018] виявила деформації верхнього шару земної кори України: розтяг–стиск, поворот, дилатацію. Це ґрунтовне дослідження, до переліку ГНСС-станцій входили також станції у Молдові, Румунії та Польщі. Серед дискусійних положень у межах цього дослідження – використання часових рядів координат станцій різної тривалості та нерівномірність розташування станцій на території України: складний геодинамічний регіон Українських Карпат охоплює лише чотири ГНСС-станції. Результати цього дослідження, а саме про стискання – розтягування ділянок земної кори та їх повороти, порівняно з дослідженнями геомагнітного поля, квазігеоїдом УКГ2012 та картою новітніх рухів земної кори території України [Орлюк та Іщенко, 2019а; Орлюк та Іщенко, 2019б]. Автори виділяють у межах території України чотири великі

сучасні морфоструктури (геоблоки): Північно-Західний (I) і Північно-Східний (II), що обертаються за годинниковою стрілкою; Південно-Західний (III) і Південно-Східний (IV), що обертаються проти годинникової стрілки, які виділяються лінеаментними зонами північно-східного і північно-західного простягання.

Остання публікація з оцінюванням швидкостей зміщень українських ГНСС-станцій у системі відліку IGB08 – робота [Khoda, 2024]. Для 233 перманентних ГНСС-станцій сформовано 356 наборів координат і 256 наборів швидкостей зміщень, які їм відповідають. Здійснено оцінку координат та швидкості зміщень українських ГНСС-станцій у системі відліку IGB08 на епоху 2005.0. Середня збіжність координат станцій становить 1,69, 1,40 і 3,63 мм для північного, східного та висотного компонентів відповідно.

Серед останніх досліджень на території Європи, які використовують, зокрема, дані декількох десятків ГНСС-станцій України, – робота зі встановлення тривимірного поля швидкостей зміщень для усієї Європи [Piña-Valdés, et. al., 2022]. [Savchyn and Bilashuk, 2023] розглядають горизонтальні геодинамічні деформації території гір Карпат за ГНСС-станціями, зокрема території Українських Карпат. Дослідження та моделювання висотних деформацій верхнього шару земної кори Польщі [Kowalczyk, et al., 2020] дає змогу зіставити деформації з аналогічними в Україні для прикордонних територій. Важливою є робота [Naumowicz et al., 2024], що містить модель абсолютних вертикальних рухів земної кори в Польщі на основі рішення PPP з урахуванням геологічної, тектонічної, гідрологічної та мінералогічної інформації. На думку авторів, такі моделі повинні бути розвинені і на території України.

Велика кількість досліджень рухів ГНСС-станцій, а також оцінювання геодинаміки України підтверджує актуальність таких досліджень. Більшість науковців приділяють увагу саме наведенню результатів швидкостей зміщень станцій [Khoda, 2024; Savchuk and Doskich, 2017] чи параметрів деформацій [Ishchenko, 2018; Marchenko et al., 2019; Doskich et al., 2023]. Водночас у деяких публікаціях окрім наведення параметрів деформацій за ГНСС-даними здійснено спробу їх інтерпретації [Орлюк та Іщенко, 2019; Tretyak and Brusak, 2020; Savchyn et al., 2021; Tretyak and Brusak, 2022; Piña-Valdés, et. al., 2022; Naumowicz et al., 2024]. Варто зазначити, що визначення актуального векторного поля зміщень земної поверхні території України дасть змогу інтерпретувати сучасні геодинамічні процеси та прогнозувати їх у часі, що важливо для розвитку опорних ГНСС-мереж країни.

У цьому дослідженні спробуємо уточнити актуальну геодинаміку регіону з використанням регулярної мережі ГНСС-станцій, наскільки це можливо в сучасних умовах воєнних дій на підконтрольній українській владі території.

Вихідні дані та їх опрацювання

Для геодинамічних досліджень, як зазначено вище, використано результати ГНСС-станцій двох мереж GeoTerrace та System.NET. Для зіставлення результатів відібрано 30-секундні добові RINEX файли з усіх станцій. Обчислення добових розв'язків ГНСС-станцій виконано у постпроцесингу за допомогою програмного забезпечення Bernese GNSS Software [Dach et al., 2015] з використанням однакової стратегії та налаштувань.

Опрацювання даних здійснено за допомогою методу подвійних різниць, станції мережі IGS використано як опорні. Обчислення виконано виключно на підставі даних GPS-сигналу. Дотримано останніх стандартів IGS14 щодо варіації фазового центра та інших коригувань, необхідних для точного розрахунку ГНСС-даних.

Опрацювання даних почалося з попередньої обробки фаз даних для кожної базової лінії за допомогою технік триплетної різниці. Останні часові продукти були використані для обчислень [Maciuk et al., 2023]. Зсуви циклів усунули, проаналізувавши різні лінійні комбінації частот L1 та L2, а ненадійні точки даних видалили або перекалібрували. Встановлено кут відсічки 7 градусів. Для оцінки тропосферних затримок були застосовані Моделі GMF і DRY-GMF з частотою оновлення кожні дві години. Іоносферні ефекти зменшили за допомогою підходу вільної від іоносфери лінійної комбінації подвійної частоти, що підвищує точність вирішення неоднозначностей. Визначення припливів твердої Землі здійснено відповідно до Конвенцій IERS 2010, які не враховують навантаження океанічних припливів, але враховують впливи атмосферного навантаження. Орбіти супутників та параметри орієнтації Землі отримано за допомогою найточніших доступних продуктів IGS, що забезпечує високу точність обчислених координат. Для оцінювання координат станцій використано алгоритм зважених найменших квадратів, з іоносферними коригуваннями, отриманими від референц-станцій, для підвищення точності.

Для оцінювання точності координат станцій застосовано алгоритм зважених найменших квадратів, з іоносферними коригуваннями, одержаними від референц-станцій, що сприяють вирішенню неоднозначностей для базових ліній, які варіюються від дуже коротких (0–20 км) до кількох тисяч кілометрів. Обчислені координати ГНСС-станцій загалом досягнуті з плановою точністю 3–4 мм по довготі та широті відповідно. Точність висотної складової становить 7–8 мм. Точність координат подано з довірчою імовірністю 95 %, що змінюється залежно від тривалості даних, забезпечуючи надійну та ретельну методологію опрацювання даних.

Геоцентричні координати X, Y, Z ГНСС станцій визначено у системі ITRF-2020. Зміщення ГНСС-станцій DX, DY, DZ обчислювали, віднімаючи координати станції на поточну епоху від координат на першу епоху.

Надалі обчислення даних виконували за такою методикою. Каталог щоденних рішень з Bernese GNSS Software експортували в спеціально розроблене програмне забезпечення. Вертикальні стрибки в часовому ряді видаляли вручну та за допомогою простого фільтра (відхилення від загального тренду понад 1 см). Зауважимо, що за трирічний чи більший період вилучено лише 0,1–0,2 % даних. Загалом дані хорошої якості. У цьому дослідженні розкладання часових рядів не виконували, а трендом є середнє значення з ряду. Не зрозуміло чітко, як визначити сезонність, шум та інші компоненти для цього часового ряду. Прикладом може бути зафіксований вплив неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) на часові ГНСС ряди у цьому регіоні [Brusak and Tretiyak, 2020; Tretiyak et al., 2021a, 2021b]. Відомо, що конвенції Міжнародної служби обертання Землі (IERS) рекомендують враховувати змодельовані деформації в програмних продуктах, спричинені приливними навантаженнями до часових ГНСС рядів. Водночас для неприливних моделей таких рекомендацій немає. Зафіксований NTAL деформує верхню земну кору, але ми не усуваємо цей вплив на основі рекомендацій IERS. Через цей та інші можливі фактори деформації ми не виконували розкладання часових рядів на складові.

Як відомо із досвіду опрацювання ГНСС-вимірів, яке виконували різні дослідники, за тривалості вимірювань на ГНСС-станції більше ніж 2,5 року точність визначення вертикальних швидкостей зміщень в межах 0,3–0,6 мм/рік [Desai et al., 2016]. Це цілком задовільний результат для визначення лінійної швидкості що, очевидно, є проявом рухів земної кори. Однак зменшення тривалості вимірювань до одного-двох років погіршує точність визначення швидкості до 1–2 мм/рік і більше [Esposito et al., 2015; Devoti et al., 2017].

Загалом, на території України опрацьовано 214 станцій, які належно функціонували хоча б три роки – 2021–2023 рр. Результати станцій та графіки їх часових рядів додатково проаналізовано:

1. Частину цих станцій відкинуто як непридатні для геодинамічних досліджень, якщо вони надавали менше ніж 200 щорічних розв'язків.

2. Точність розв'язків розглядали окремо, оскільки помітне зниження точності даних через воєнні фактори: глушіння чи спотворення ГНСС-сигналу в окремих регіонах України [Brusak et al., 2024]. Відкидали добові розв'язки з низькою СКП

розв'язків: планова точність нижче за 10 мм, а висотна – менша за 30 мм.

3. На кінцевому етапі до уваги брали геометрію мережі. У великих містах відстань між ГНСС-станціями у деяких випадках становить до 10 км. У такому разі для подальшого розгляду залишали ГНСС-станцію із меншою похибкою часового ряду. Переважно такі ГНСС-станції мали і довші часові ряди. На менших за 10 км відстанях залишали станції, які розташовані на різних тектонічних структурах, як показує зіставлення з тектонічною картою [Національний атлас України, 2007], чи розташовані через природні розмежування, наприклад, станції по двох берегах річки Дніпро.

Під час аналізу часових серій враховано заміну антен для деяких ГНСС-станцій. Для прикладу на рис. 1 показано просторові зміщення ГНСС-станції SULP по геоцентричних осях X, Y, Z системи координат ITRF-2020. Зміщення DZ по осі Z мають сезонні відхилення [Davis et al., 2012; Gruszczynska et al., 2017] від лінії тренду. Власне, для усунення впливу сезонних коливань потрібні максимально тривалі ряди спостережень. Лінія тренду відображає лінійну швидкість зміщення ГНСС-станції по відповідних осях (рис. 1).

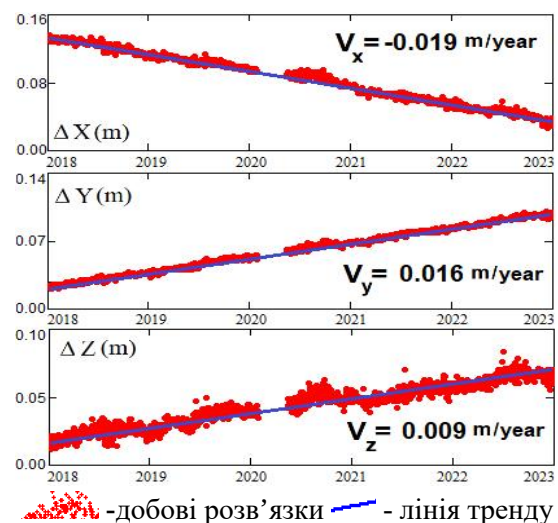


Рис. 1. Просторово-часові ряди зміщень ГНСС-станції SULP у системі координат ITRF-2020.

У результаті отримано мережу на територію України без тимчасово окупованих територій з 168 ГНСС-станцій. Відстань між сусідніми ГНСС-станціями одержаної сукупної мережі станцій GeoTerrace та System.NET становить у середньому 50–70 км, що ефективно для диференціації сучасної геодинаміки охоплених мережею територій. На рис. 2 наведено розташування ГНСС-станцій.

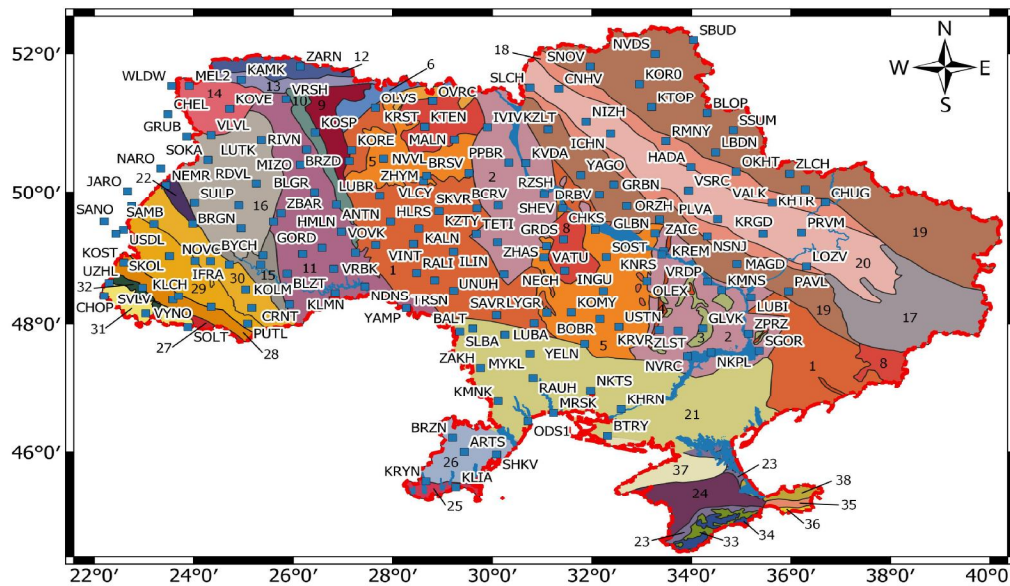


Рис. 2. Розташування ГНСС-станцій на тлі тектонічної карти території України (за матеріалами [Національний атлас України, 2007].)

- Умовні позначення до рис. 1 :
- ZOLH – ГНСС-станції,
- Легенда до тектонічної карти:**
УКРАЇНСЬКИЙ ЩИТ
Мегаблоки
Структурні поверхні
- 1 – Гранулітовий та грануліт-діафорит-гранітовий плутоно-метаморфічний комплекс раннього еогею (ранній архей);
- 2 – Амфіболіт-гранітові плутоно-метаморфічні комплекси пізнього еогею (середній архей);
- 3 – Зеленокам'яний металовулканічний комплекс раннього протогою (пізній архей);
- 4 – Залізо-кременисто-сланцеві (метахемогенно-теригенно-вulkanогенні) комплекси пізнього протогою (пізній архей – ранній протерозой);
- 5 – Гнейсо-сланцеві (метакарбонатно-теригенні) комплекси пізнього протогою;
- Прогини, пояси та автономні масиви**
- 6 – Волинсько-поліський пояс: осницкий вулcano-плутонічний комплекс кінця пізнього протогою;
- 7 – Овруцький прогин та його сателіти: овруцький вулcano-осадовий комплекс раннього неогеою;
- 8 – Автономні інтрузивні масиви заключних стадій кратонізації;
- СТРУКТУРИ ЧОХЛА**
ВОЛИНСЬКО-ПОДІЛЬСЬКА ПЛИТА
Структури, які сформувалися в епоху:
 а) байкальсько-каледонську
- 9 – Волинсько-Подільський прогин (на домезозойському зрізі);
- 10 – Волинський траповий покрив (на домезозойському зрізі);
- 11 – Волинсько-Подільська монокліналь;
- б) байкальсько-герцинську
- 12 – Поліська сідловина;
- 13 – Північноукраїнська горстова зона;
- в) герцинську
- 14 – Ковельський виступ;
- 15 – Боянецький прогин (на домезозойському зрізі);
- 16 – Львівський палеозойський прогин;
- 17 – Донецька герцинська споруда;
 Дніпровсько-Донецька западина
- 18 – Прибортові зони;
- 19 – Бортові зони;
- 20 – Центральна зона (грабен);
 г) альпійську
- 21 – Південноукраїнська монокліналь;
ЕПІОРОГЕННІ ЗОНИ (“МОЛОДІ ПЛАТФОРМИ”)
 а) епікаледонська
- 22 – Рава-Руська
 б) герцинсько-кімерійська
- 23 – Скіфська;
- 24 – Центральнокримське підняття;
- 25 – Нижньопруський виступ;
- 26 – Переддобруджинський прогин;
АЛЬПІЙСЬКІ СКЛАДЧАСТО-ПОКРИВНІ
ОРОГЕННІ СПОРУДИ
 Карпати
- 27 – Мармароський масив;
- 28 – Внутрішні флішові покриви і зони скель;
- 29 – Зовнішні флішові покриви;
- 30 – Передкарпатський прогин;
- 31 – Закарпатський прогин;
- 32 – Вулканічні Карпати;
 Кримські гори
- 33 – Таврійський;
- 34 – Яйли;
- 35 – Владиславський;
- 36 – Краснопілський;
АЛЬПІЙСЬКІ ПРОГИНИ
- 37 – Каркінітський;
- 38 – Індуло-Кубанський;

У табл. 1 наведено обчислені річні швидкості зміщень V_N (напрямок на північ), V_E (напрямок на схід) та

V_H (напрямок по висоті) відібраних ГНСС- станцій та оцінку їх точності у системі координат ETRF-2020.

Таблиця 1

Компоненти векторів лінійних річних швидкостей зміщень ГНСС-станцій та оцінка їх точності (ETRF-2020)

ГНСС-станція	Річні швидкості, мм/рік			СКП річних швидкостей, мм			ГНСС-станція	Річні швидкості, мм/рік			СКП річних швидкостей, мм			ГНСС-станція	Річні швидкості, мм/рік			СКП річних швидкостей, мм		
	V_N	V_E	V_H	V_N	V_E	V_H		V_N	V_E	V_H	V_N	V_E	V_H		V_N	V_E	V_H	V_N	V_E	V_H
ANTN	-0,7	-0,9	-2,9	0,0	0,0	0,1	KRGD	-1,0	-0,9	-0,4	0,1	0,1	0,1	SAVR	-1,3	-1,3	-1,2	0,0	0,0	0,1
ARTS	0,1	-0,4	-0,0	0,1	0,1	0,1	KRST	0,8	-1,1	-2,4	0,2	0,2	0,4	SBUD	-1,2	-1,2	-3,7	0,1	0,1	0,2
BALT	-0,4	-0,5	0,8	0,1	0,1	0,1	KRVR	-1,3	-0,3	-2,5	0,1	0,1	0,1	SGOR	-0,3	1,1	0,8	0,1	0,1	0,2
BCRV	0,1	0,1	-3,2	0,1	0,1	0,2	KRYN	-1,0	-0,7	-2,7	0,1	0,1	0,1	SHEV	0,7	-1,0	-0,7	0,1	0,1	0,1
BLGR	0,1	-0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	KTEN	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	SHKV	-1,4	-1,2	-2,0	0,1	0,0	0,1
BLOP	-1,5	-1,8	-2,5	0,1	0,1	0,2	KTOP	-0,1	-0,1	-0,5	0,1	0,1	0,1	SHVC	-1,7	-1,9	-1,0	0,1	0,1	0,1
BLZT	-0,3	0,5	-3,8	0,0	0,0	0,1	KVDA	-0,1	-0,5	0,0	0,1	0,1	0,2	SKOL	0,1	-0,4	-0,7	0,0	0,0	0,1
BOBR	-0,5	-1,3	0,2	0,1	0,1	0,1	KZLT	0,0	-0,1	-0,7	0,1	0,1	0,1	SKVR	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,1	0,1
BRGN	0,2	-0,4	-1,4	0,0	0,0	0,1	KZTY	0,0	-0,6	-0,1	0,1	0,2	0,1	SLBA	-0,6	-0,7	-0,4	0,0	0,0	0,1
BRSV	-2,4	-1,6	-2,3	0,1	0,1	0,1	LBDN	-0,1	-1,4	-0,9	0,1	0,1	0,1	SLCH	-0,6	-0,8	2,0	0,1	0,1	0,2
BRZD	-2,2	-2,0	0,7	0,0	0,1	0,1	LOZV	-0,9	-0,9	-0,0	0,1	0,1	0,1	SNOV	0,2	0,6	-0,3	0,1	0,1	0,1
BRZN	-2,0	-1,0	-2,0	0,1	0,1	0,1	LUBA	-0,7	-0,8	0,8	0,1	0,1	0,1	SOKA	0,3	-0,1	-0,4	0,0	0,0	0,1
BTRY	0,6	-0,7	1,4	0,1	0,1	0,2	LUBI	-0,6	-0,8	0,0	0,1	0,1	0,1	SOLT	-0,3	-0,5	-0,5	0,0	0,0	0,1
BUCH	0,5	-1,3	-0,3	0,1	0,0	0,1	LUBR	-0,2	-0,8	-0,7	0,1	0,1	0,1	SOST	-0,7	-0,5	-1,0	0,1	0,1	0,1
BYCH	-1,5	-1,4	-2,7	0,0	0,0	0,1	LUTK	-0,4	-0,7	-2,1	0,1	0,0	0,1	SSUM	0,3	0,1	-0,3	0,1	0,1	0,1
CHEL	-0,8	-0,8	-1,7	0,0	0,0	0,1	LYGR	-1,2	-0,5	-1,1	0,1	0,1	0,1	SULP	0,2	-0,4	-1,3	0,0	0,0	0,1
CHKS	-0,7	0,9	-0,7	0,1	0,1	0,2	MAGD	-0,1	-0,3	-1,3	0,1	0,1	0,1	SVLV	-0,1	-0,5	-0,9	0,0	0,0	0,1
CHOP	-0,8	-0,6	-0,1	0,0	0,0	0,1	MALN	-0,9	-0,9	-0,8	0,1	0,1	0,1	TERE	-0,8	-0,9	-1,4	0,1	0,1	0,1
CHUG	0,4	-0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	MEL2	-1,8	-1,1	-1,8	0,1	0,1	0,1	TETI	-0,3	-1,0	-1,1	0,1	0,1	0,1
CNHV	-1,3	-3,8	-1,1	0,1	0,2	0,2	MIZO	0,5	0,9	0,0	0,1	0,1	0,1	TRNO	0,3	-0,5	-0,7	0,1	0,1	0,2
CRNT	-0,1	-0,5	-0,6	0,0	0,0	0,1	MRSK	-0,7	-0,9	-1,2	0,1	0,1	0,1	TRSN	-1,6	-1,1	-1,3	0,1	0,1	0,1
DLNA	4,3	-1,2	0,7	0,1	0,1	0,2	MYKL	-1,9	-0,5	-1,0	0,1	0,1	0,1	TULC	0,0	-0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
DRBV	0,5	0,1	1,4	0,1	0,1	0,1	MYKO	0,1	-0,9	-1,2	0,0	0,0	0,1	UNUH	-1,0	-1,9	1,6	0,1	0,1	0,1
GLBN	-0,3	-0,0	-1,1	0,1	0,1	0,1	NARO	-3,0	-2,3	0,0	0,1	0,0	0,1	USDL	-0,6	-0,6	-1,8	0,0	0,0	0,1
GLVK	-0,4	-0,8	-0,5	0,1	0,2	0,3	NDNS	-2,8	-2,6	-0,7	0,1	0,0	0,1	USTN	-2,5	1,3	0,8	0,1	0,1	0,1
GORD	-0,9	-0,3	-0,9	0,1	0,1	0,1	NECH	-0,7	-0,7	-0,3	0,1	0,1	0,1	UZHL	0,4	-1,8	0,9	0,1	0,1	0,1
GRBN	0,5	0,3	-1,2	0,1	0,1	0,2	NEMR	-1,1	-1,1	-2,9	0,1	0,0	0,1	VALK	0,8	0,3	1,9	0,1	0,1	0,2
GRDS	-2,4	-1,4	-1,8	0,1	0,1	0,1	NIZH	-0,3	-0,4	-1,1	0,1	0,1	0,1	VATU	0,0	0,2	0,9	0,1	0,1	0,1
GRUB	-1,6	-0,6	-1,1	0,1	0,1	0,1	NKPL	-0,9	-0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	VINK	-0,6	-1,0	-0,3	0,1	0,1	0,1
GUSI	0,6	-0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	NKTS	0,2	-0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	VINT	0,1	-0,4	0,7	0,1	0,1	0,1
HADA	0,4	-0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	NOVC	-1,3	-1,2	-4,0	0,1	0,0	0,1	VLCY	-0,3	-0,6	-1,0	0,1	0,1	0,1
HLRS	1,5	-1,3	0,5	0,1	0,1	0,4	NSNJ	-3,0	-3,1	-3,2	0,1	0,1	0,1	VLVL	0,2	-0,5	-1,4	0,0	0,0	0,0
HMLN	-0,3	-0,6	1,3	0,1	0,1	0,2	NVDS	-0,8	-0,4	-0,9	0,1	0,1	0,1	VOVK	-1,4	-1,7	-0,4	0,0	0,0	0,1
ICHN	-0,1	-0,2	-0,8	0,1	0,1	0,2	NVRC	-2,6	-2,3	-1,7	0,1	0,1	0,1	VRBK	-2,1	-2,6	-0,5	0,1	0,1	0,1
IFRA	1,4	-0,5	-0,7	0,0	0,0	0,1	NVVL	0,5	-0,5	-0,2	0,1	0,1	0,1	VRDP	-0,5	-0,5	-1,1	0,1	0,1	0,1
ILIN	-1,6	-0,6	-4,3	0,1	0,1	0,1	ODS1	-0,8	-1,0	1,6	0,1	0,1	0,1	VRSH	0,1	-0,0	-0,3	0,1	0,1	0,1
INGU	0,1	-0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	OKHT	-0,2	0,1	-1,0	0,1	0,1	0,1	VSRC	1,1	0,2	-0,2	0,1	0,1	0,1
IVIV	-0,5	-0,5	-1,9	0,1	0,1	0,2	OLEX	-0,9	-1,1	2,0	0,1	0,1	0,2	VYNO	-1,1	-0,7	-1,2	0,0	0,0	0,1
JARO	-0,8	-1,1	1,0	0,1	0,1	0,1	OLVS	0,3	-0,3	-0,5	0,1	0,1	0,1	VYZN	0,4	-0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
KALN	0,2	-0,3	-0,2	0,1	0,1	0,1	ORZH	-0,6	-1,4	-2,0	0,1	0,1	0,1	WLDW	-1,1	-1,2	-1,9	0,1	0,1	0,1
KAMK	-0,3	-0,5	-1,3	0,0	0,0	0,1	OVRC	-1,6	-1,1	1,1	0,1	0,1	0,2	YAGO	-0,0	0,2	-0,5	0,1	0,1	0,1
KHRN	-0,4	-0,6	0,8	0,1	0,1	0,1	PAVL	0,4	0,3	-0,8	0,1	0,1	0,2	YAMP	-0,8	-1,2	-1,2	0,1	0,1	0,1
KHTR	-0,2	-1,1	-1,5	0,1	0,1	0,1	PERV	0,0	-0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	YASN	-1,1	-1,8	-0,2	0,1	0,1	0,1
KLCH	-0,5	-0,4	0,6	0,1	0,0	0,1	PLVA	0,1	0,4	-3,1	0,0	0,1	0,2	YELN	-2,2	-1,7	-1,8	0,1	0,1	0,1
KLIA	-0,4	-0,4	-0,5	0,1	0,1	0,1	POLN	-0,6	-1,6	0,1	0,1	0,1	0,1	ZAIC	-1,9	-1,8	-2,0	0,1	0,1	0,1
KLMN	-1,7	-1,8	-0,2	0,1	0,1	0,1	PPBR	-1,0	-2,5	-1,5	0,1	0,1	0,2	ZAKH	-2,5	-2,6	-0,9	0,1	0,1	0,1
KMNK	-2,8	-1,2	-3,2	0,1	0,1	0,1	PRVM	-2,0	-1,9	-1,2	0,1	0,1	0,2	ZARN	-2,3	-1,6	-0,9	0,1	0,1	0,1
KMNS	-3,4	-2,4	-4,7	0,1	0,1	0,2	PRZM	-0,3	-1,7	-1,0	0,1	0,1	0,1	ZBAR	-1,4	-1,2	-1,3	0,1	0,1	0,1
KNRS	-1,2	-1,5	1,0	0,1	0,2	0,2	PUTL	-1,5	-1,1	-1,6	0,1	0,0	0,1	ZHAS	-0,3	-0,9	0,9	0,1	0,1	0,1
KOLM	-2,0	-1,8	-1,8	0,1	0,1	0,1	RALI	-1,5	-1,4	0,4	0,1	0,1	0,1	ZHYM	0,5	-0,5	-0,4	0,1	0,1	0,1
KOMY	-0,7	-1,2	1,0	0,1	0,2	0,1	RAUH	-1,6	-1,8	-1,3	0,1	0,1	0,1	ZLCH	-0,2	0,3	-0,1	0,1	0,1	0,1
KORO	-0,4	-1,5	1,3	0,1	0,1	0,1	RDVL	0,3	-0,4	-1,4	0,0	0,0	0,1	ZLST	-0,1	-0,2	0,9	0,2	0,1	0,2
KORE	-0,5	0,6	-0,9	0,2	0,3	0,4	RIVN	0,7	-0,2	-0,7	0,0	0,0	0,1	ZOLH	1,2	-1,5	-1,9	0,0	0,0	0,0
KOSP	-1,4	-0,9	0,7	0,1	0,1	0,1	RMNY	-1,0	-1,3	-0,5	0,1	0,1	0,1	ZPRZ	-0,1	-0,1	0,9	0,1	0,1	0,2
KOST	0,0	0,3	-0,5	0,1	0,1	0,1	RZSH	-0,7	-1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	Макс	4,3	1,3	2,0	0,2	0,3	0,4
KOVE	-0,1	-0,4	-1,2	0,1	0,0	0,1	SAMB	-0,2	-0,3	-1,2	0,0	0,0	0,1	Мін,	-3,4	-3,8	-4,7	0,0	0,0	0,0
KREM	0,2	0,1	-0,5	0,1	0,1	0,2	SANO	-0,9	-1,6	0,2	0,0	0,0	0,1	Сеп,	-0,6	-0,8	-0,7	0,1	0,1	0,1

Відповідно до значень, наведених у табл. 1, в середньому горизонтальні швидкості зміщень ГНСС-станцій взаємокомпенсуються. Максимальна річна швидкість зміщень у напрямку на північ становить 4,3 мм/рік для станції ILIN, а на південь – 3,4 мм/рік для станції KMNS. Максимальна річна швидкість зміщень у напрямку на схід дорівнює 2,9 мм/рік для станції SHAZ, а на захід – 3,8 мм/рік для станції CNHV.

Вертикальні швидкості зміщень у розглянутому регіоні для більшості ГНСС-станцій є від’ємними, але трапляються і підняття окремих ГНСС-станцій, що відповідає результатам [Khoda, 2024]. У середньому для усіх ГНСС-станцій швидкість просідань становить 0,7 мм/рік. За даними табл. 1 побудовано карти сучасних вертикальних і горизонтальних рухів верхнього шару земної кори на територію України.

Сучасні вертикальні рухи земної кори території України

На рис. 3 наведено вертикальні вектори швидкостей зміщень ГНСС-станцій мережі. З метою виділення загальних тенденцій на основі вертикальних даних здійснено інтерполювання у вигляді ізоліній швидкостей зміщень. Ізолінії проведено через 1 мм/рік. Поле швидкостей вертикальних рухів земної кори території України є неоднорідним: значення змінюються від –3 мм до +2 мм/рік і загалом векторне поле структуроване тектонічними розломами.

На території заходу України здебільшого відбувається опускання території зі швидкістю 1–3 мм за рік. Аномальне підняття із середньою швидкістю 0,5 мм/рік зафіксоване в районі тектонічних розломів на території Прикарпаття та Закарпаття. Північна частина Волинсько-Подільської моноклінали також зазнає підняття зі швидкістю 0,5–1 мм/рік, а

південна частина, навпаки, опускається з швидкістю 0,5–1 мм/рік. Загалом вертикальна динаміка відповідає попереднім дослідженням, здійсненим у регіоні заходу України [Tretyak and Brusak, 2022].

У південно-західній частині українського щита поле вертикальних швидкостей зміщень так само диференційоване: у північній частині характерні опускання зі швидкістю 0,5–1 мм/рік, а в південно-західній – підняття зі швидкістю 0,5–1 мм/рік. На південних окраїнах Українського щита вертикальні рухи земної кори різко диференційовані: в північній частині відбувається підйом зі швидкістю 0,5–1 мм/рік, натомість в південній частині – опускання 0,5–1 мм/рік (Південно-Українська монокліналь).

Територія Дніпровсько-Донецької западини характеризується здебільшого від’ємними вертикальними швидкостями зміщень від 0,5 до 1 мм/рік. На межі розломів у деяких місцях проявляються додатні вертикальні швидкості зміщень 0,5–1 мм/рік, які можуть бути проявом геологічної активності або локальними геодинамічними процесами. Територія Переддобруджинського прогину і Південноукраїнської моноклінали має однорідне векторне поле з швидкістю опускання 1–2 мм/рік.

Сучасні горизонтальні рухи земної кори території України

На рис. 4 подано згущену векторну модель горизонтальних зміщень земної кори у системі координат ETRF-2020 на території України за даними ГНСС-станцій за 2018–2021 рр.

Загальна тенденція горизонтальних рухів земної поверхні території України проявляється у спрямуванні векторів швидкостей зміщень у південно-західному напрямку із середньою швидкістю 1–2 мм/рік

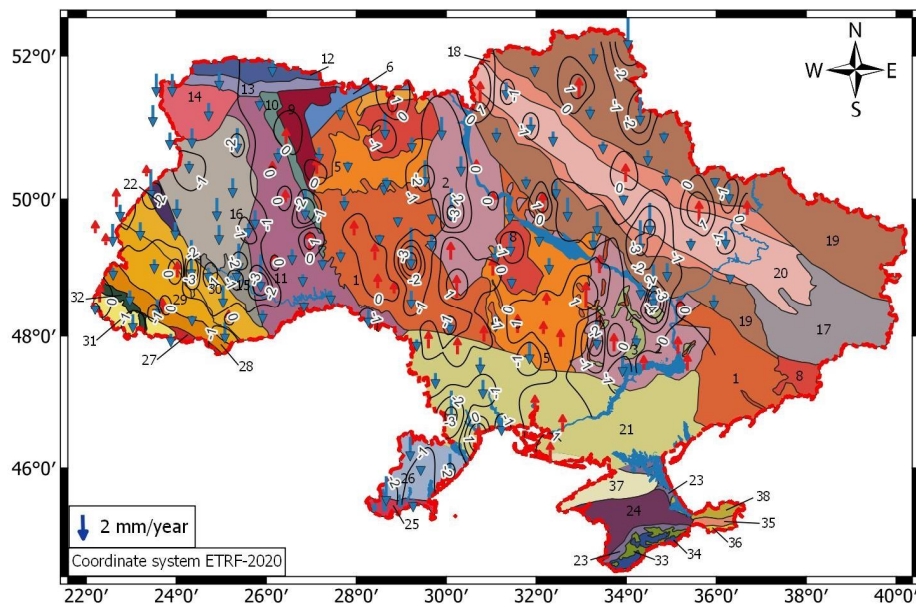


Рис. 3. Вертикальні швидкості зміщень ГНСС-станцій на території України.
Легенду до тектонічної карти подано на рис. 2.

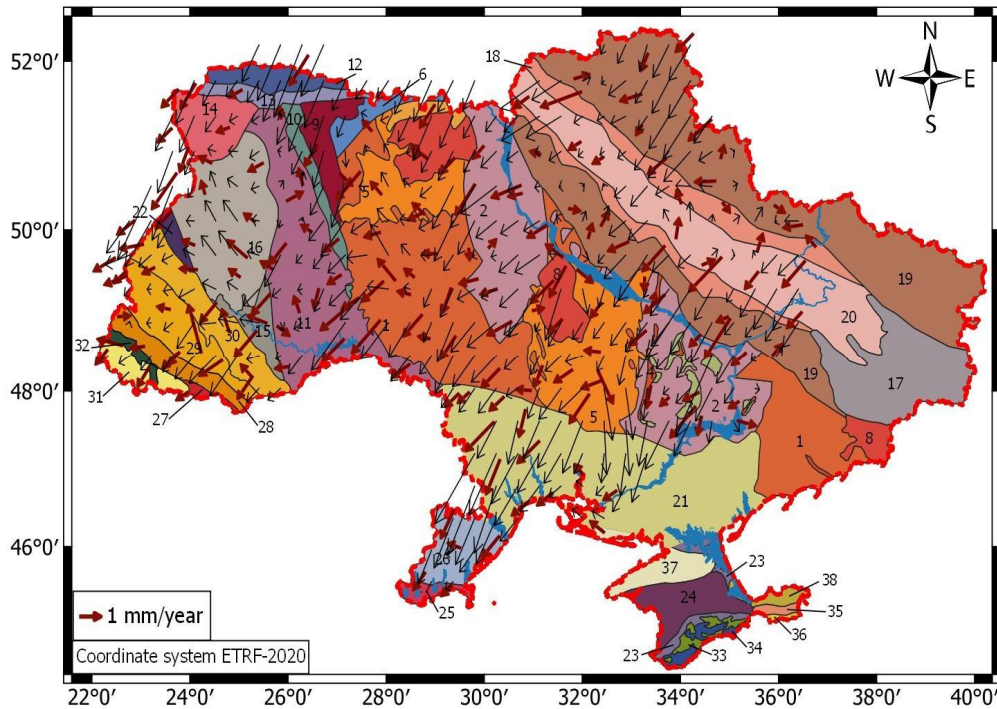


Рис. 4. Згущена векторна модель горизонтальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій у системі координат ETRF-2020 на території України. Легенду подано на рис. 2.

Територія Дніпровсько-Донецької западини в північній частині характеризується однорідною швидкістю зміщень 2 мм/рік у південно-західному напрямку. На межі центральної та прибережної зон з'являються аномальні швидкості зміщень (0,5 мм/рік), які спрямовані протилежно. У центральній зоні знову продовжується тенденція орієнтації векторів у південно-західному напрямку зі швидкістю зміщень 0,5–1 мм/рік.

Аномальною зоною є гнейсо-сланцеві (метакарбонатно-теригенні) комплекси пізнього протогею. Ця територія характеризується аномальними швидкостями зміщень векторів, спрямованими на північ зі значенням 0,5 мм/рік. Зазначимо, що і вертикальні деформації цієї території також аномальні. На заході України аномальним є Львівський палеозойський прогин, де вектори так само спрямовані в північно-східному напрямку зі швидкістю зміщень 1 мм/рік.

Розподіл швидкостей горизонтальних зміщень прив'язаний до границь Українського щита: на північних окраїнах границь горизонтальні швидкості зміщень зменшуються до 0,5–1 мм/рік, а на південних окраїнах поступово зростають у південному напрямку до 2 мм/рік.

На території Прикарпатського і Закарпатського прогинів поле векторів швидкостей зміщень диференційоване за геологічними структурами і прив'язане до границь тектонічних розломів. Ха-

рактерною є зона глибинного розлому Терсейра-Торнквіста, на північній окраїні якого прямують векторів швидкостей зміщень північно-західне, а на південній окраїні – напрям векторів південно-західний.

На останньому етапі дослідження виконано порівняння обчислених горизонтальних швидкостей із залишковими модельними значеннями ITRF-2020. Для 168 ГНСС-станцій визначено модельні швидкості зміщень у системі ITRF-2020 за допомогою програмного забезпечення [GAGE]. Проекції векторів у напрямку на північ становлять 21–24 мм/рік та 11–14 мм/рік у напрямку на схід. Оскільки такі значення мають чітке скерування на північний схід та їх незручно порівнювати з малими обчисленими векторами в ETRF-2020, здійснено перехід до регіональних значень деформацій. Цей перехід здійснено простим методом віднімання від швидкостей кожної ГНСС-станції максимального значення швидкості зміщень з 168 станцій по кожній з осей відповідно.

У табл. 2 наведено компоненти векторів лінійних річних швидкостей зміщень ГНСС-станцій за залишковими модельними значеннями ITRF-2020. Відповідно до значень, наведених у табл. 2, найбільша річна швидкість зміщень у напрямку на південь становить 2,7 мм/рік для станцій MEL2 та CHNL, а на захід – 2,6 мм/рік для станції CHUG. За результатами табл. 2 створено згущену залишкову векторну модель на територію України.

Таблиця 2

**Компоненти векторів лінійних річних швидкостей зміщень ГНСС-станцій
за залишковими модельними значеннями ITRF-2020**

ГНСС-станція	Річна швидкість на північ V_N , мм/рік	Річна швидкість на схід V_E , мм/рік	ГНСС-станція	Річна швидкість на північ V_N , мм/рік	Річна швидкість на схід V_E , мм/рік	ГНСС-станція	Річна швидкість на північ V_N , мм/рік	Річна швидкість на схід V_E , мм/рік
ANTN	-1,8	-0,7	KRGD	-0,3	-2,3	SAVR	-0,9	-1,3
ARTS	-0,6	-1,2	KRST	-1,7	-1,0	SBUD	-1,1	-2,0
BALT	-0,9	-1,2	KRVR	-0,4	-1,9	SGOR	0,0	-2,3
BCRV	-1,2	-1,3	KRYN	-0,7	-1,0	SHEV	-1,0	-1,5
BLGR	-1,9	-0,7	KTEN	-1,7	-1,0	SHKV	-0,5	-1,3
BLOP	-0,8	-2,1	KTOP	-1,0	-1,9	SHVC	-0,9	-1,5
BLZT	-1,7	-0,6	KVDA	-1,3	-1,4	SKOL	-2,2	-0,2
BOBR	-0,6	-1,7	KZLT	-1,3	-1,5	SKVR	-1,3	-1,2
BRGN	-2,0	-0,4	KZTY	-1,4	-1,1	SLBA	-1,0	-1,2
BRSV	-1,4	-1,2	LBDN	-0,7	-2,1	SLCH	-1,5	-1,4
BRZD	-1,9	-0,8	LOZV	-0,1	-2,5	SNOV	-1,3	-1,6
BRZN	-0,7	-1,1	LUBA	-0,8	-1,3	SOKA	-2,4	-0,3
BTRY	-0,2	-1,7	LUBI	-0,2	-2,3	SOLT	-1,9	-0,3
BUCH	-1,9	-0,5	LUBR	-1,7	-0,9	SOST	-0,7	-1,7
BYCH	-1,9	-0,5	LUTK	-2,2	-0,5	SSUM	-0,7	-2,2
CHEL	-2,7	-0,2	LYGR	-0,8	-1,5	SULP	-2,3	-0,3
CHKS	-0,8	-1,7	MAGD	-0,3	-2,2	SVLV	-2,2	-0,1
CHOP	-2,3	0,0	MALN	-1,6	-1,2	TERE	-2,1	-0,2
CHUG	-0,2	-2,6	MEL2	-2,7	-0,3	TETI	-1,2	-1,2
CNHV	-1,4	-1,5	MIZO	-2,0	-0,6	TRNO	-2,0	-0,5
CRNT	-1,6	-0,6	MRSK	-0,5	-1,5	TRSN	-1,1	-1,1
DLNA	-2,1	-0,3	MYKL	-0,7	-1,4	TULC	-1,2	-1,1
DRBV	-0,9	-1,7	MYKO	-2,2	-0,3	UNUH	-1,0	-1,3
GLBN	-0,6	-1,9	NARO	-2,5	-0,2	USDL	-2,5	-0,1
GLVK	-0,2	-2,1	NDNS	-1,4	-0,8	USTN	-0,5	-1,8
GORD	-1,7	-0,7	NECH	-0,8	-1,5	UZHL	-2,4	-0,0
GRBN	-0,9	-1,7	NEMR	-2,5	-0,2	VALK	-0,3	-2,4
GRDS	-0,9	-1,5	NIZH	-1,2	-1,6	VATU	-0,9	-1,5
GRUB	-2,5	-0,3	NKPL	-0,1	-2,1	VINK	-1,6	-0,8
GUSI	-1,8	-0,6	NKTS	-0,4	-1,6	VINT	-1,4	-1,0
HADA	-0,7	-2,0	NOVC	-2,1	-0,3	VLCY	-1,6	-1,0
HLRS	-1,5	-0,9	NSNJ	-0,5	-2,1	VLVL	-2,4	-0,3
HMLN	-1,7	-0,8	NVDS	-1,1	-1,9	VOVK	-1,5	-0,9
ICHN	-1,1	-1,7	NVRC	-0,2	-2,0	VRBK	-1,6	-0,7
IFRA	-2,0	-0,4	NVVL	-1,8	-0,9	VRDP	-0,3	-2,1
ILIN	-1,2	-1,1	ODS1	-0,5	-1,4	VRSH	-2,3	-0,6
INGU	-0,6	-1,7	OKHT	-0,6	-2,2	VSRC	-0,6	-2,0
IVIV	-1,5	-1,3	OLEX	-0,5	-1,9	VYNO	-2,1	-0,1
JARO	-2,6	-0,1	OLVS	-1,9	-0,9	VYZN	-1,8	-0,5
KALN	-1,4	-1,0	ORZH	-0,8	-1,8	WLDW	-2,7	-0,2
KAMK	-2,5	-0,4	OVRC	-1,8	-1,1	YAGO	-1,0	-1,6
KHRN	-0,3	-1,8	PAVL	-0,1	-2,4	YAMP	-1,2	-1,0
KHTR	-0,3	-2,5	PERV	-0,8	-1,4	YASN	-1,9	-0,3
KLCH	-2,1	-0,2	PLVA	-0,5	-2,1	YELN	-0,6	-1,6
KLIA	-0,6	-1,2	POLN	-2,5	-0,0	ZAIC	-0,6	-1,9
KLMN	-1,5	-0,7	PPBR	-1,3	-1,3	ZAKH	-0,8	-1,2
KMNK	-0,7	-1,3	PRVM	-0,2	-2,5	ZARN	-2,3	-0,6
KMNS	-0,3	-2,2	PRZM	-2,5	-0,1	ZBAR	-2,0	-0,6
KNRS	-0,6	-1,9	PUTL	-1,7	-0,4	ZHAS	-1,1	-1,3
KOLM	-1,8	-0,4	RALI	-1,3	-1,0	ZHYM	-1,6	-1,1
KOMY	-0,7	-1,6	RAUH	-0,6	-1,4	ZLCH	-0,4	-2,4
KOR0	-1,1	-1,8	RDVL	-2,1	-0,5	ZLST	-0,3	-2,0
KORE	-1,9	-0,8	RIVN	-2,1	-0,6	ZOLH	-2,1	-0,4
KOSP	-2,1	-0,7	RMNY	-0,8	-1,9	ZPRZ	-0,1	-2,3
KOST	-2,4	-0,1	RZSH	-1,1	-1,5	Макс	0,0	0,0
KOVE	-2,5	-0,4	SAMB	-2,4	-0,2	Мін,	-2,7	-2,6
KREM	-0,6	-1,9	SANO	-2,6	0,0	Сер,	-1,3	-1,2

На рис. 5 подано згущену модель залишкового поля горизонтальних швидкостей зміщень земної

поверхні, отриману на основі моделі ITRF-2020 (чорні стрілки).

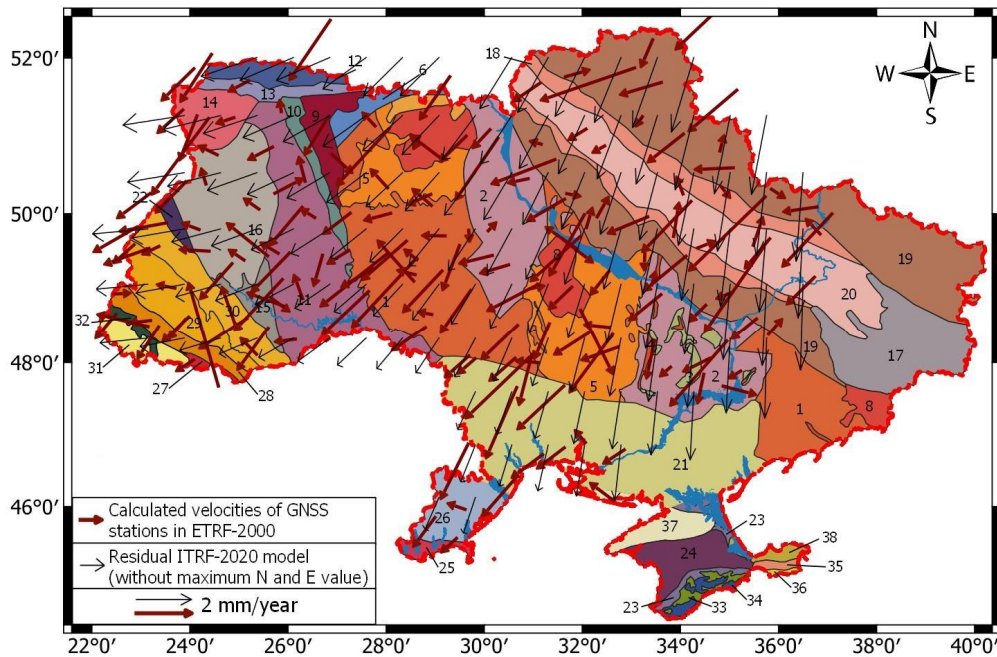


Рис. 5. Згущена векторна залишкова модель ITRF-2020 та обчислені горизонтальні швидкості зміщень ГНСС-станцій в ETRF-2020 на території України. Легенду до тектонічної карти подано на рис. 2.

З рис. 5 видно, що залишкові модельні значення мають переважно південно-західне спрямування зі швидкостями 1,2–2,7 мм/рік. Отримане векторне поле, яке ми обчислили в системі ETRF - 2020 (червоні стрілки), відображає локальні геодинамічні процеси, згладжені в залишковій моделі ITRF-2020. Необхідно зазначити, що загальна тенденція залишкового модельного поля векторів ITRF-2020 та векторного поля ETRF-2020 має подібну кінематику. Особливо це проявляється в районах таких тектонічних структур: гранулітовий та грануліт-діафорит-гранітовий плутоно-метаморфічний комплекс раннього еогею, амфіболіт-гранітові плутоно-метаморфічні комплекси пізнього еогею, Переддобруджинський прогин, Ковельський виступ та Закарпатський прогин.

Аномальними регіонами щодо неоднорідностей зміщень між залишковою моделлю ITRF-2020 та обчисленими горизонтальними швидкостями зміщень ГНСС-станцій є Дніпровсько-Донецька западина, особливо бортова зона, Волинський траповий покрив, зона глибинного розлому Терсейра-Торнквіста і Закарпатського глибинного тектонічного розлому, що підтверджує прояв локальних геодинамічних процесів на межі зон тектонічних структур.

Висновки

1. За даними виконаних досліджень встановлено та проаналізовано сучасні вертикальні та горизонтальні рухи на території України за даними ГНСС-станцій мереж GeoTerrace з 2018 до 2023 рр. та System.NET з 2021 до 2023 рр. Для

дослідження взято просторово-часові ряди 168 ГНСС-станцій. Відстань між сусідніми ГНСС-станціями отриманої мережі уможливує умовно рівномірне покриття території дослідження із середньою відстанню між станціями 50–70 км.

2. Побудована карта ізоліній та векторів вертикальних зміщень ГНСС-станцій дає підстави для висновку, що більшість ГНСС-станцій зазнають просідань, імовірно, через денудаційні процеси. Поле швидкостей вертикальних рухів земної кори території України неоднорідне: швидкості змінюються від –3 мм до +2 мм/рік. На побудованих картах горизонтальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій помітно, що загалом векторне поле швидкостей зміщень структуроване тектонічними розломами. Загальна тенденція горизонтальних рухів земної поверхні території України проявляється у південно-західному спрямуванні векторів швидкостей зміщень із середньою швидкістю 1–2 мм/рік. Аномальні швидкості вертикальних і горизонтальних рухів земної поверхні поодиноких станцій можуть бути проявом просторової нестабільності конструкції ГНСС-станцій або локальних приповерхневих гідрогеологічних процесів.

3. Аномальною зоною є гнейсо-сланцеві (метакарбонатно-теригенні) комплекси пізнього протогою. Ця територія характеризується аномальними горизонтальними та вертикальними швидкостями зміщень щодо регіонів довкола неї. Водночас, як і в попередніх дослідженнях [Tretyak and Brusak, 2022], на заході України аномальний за деформаціями Львівський палеозойський прогин.

4. Виконано порівняння залишкової векторної моделі ITRF-2020 та горизонтальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій в ETRF-2020 на території України, які ми обчислили. Залишкові модельні вектори швидкостей ITRF-2020 мають південно-західне спрямування зі значеннями 1,2–2,7 мм/рік. Ці швидкості зміщень характеризуються співмірністю за значенням та близькі за напрямом з тими, що ми обчислили. Векторне поле, яке ми обчислили в системі ETRF-2020, відображає локальні геодинамічні процеси, гладжені в залишковій моделі ITRF-2020.

5. Результати досліджень свідчать, що деформації території України є нерівномірними. Надалі для аналізу відзначених зон деформацій варто перейти до детальніших карт з використанням додаткових даних геологічної та геофізичної розвідки.

Список літератури

- Висотенко Р. О. (2010). Визначення швидкостей зміни координат постійно діючих станцій і періодично діючих пунктів УПМ ГНСС за результатами супутникових геодезичних спостережень 1995–2007 років. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1 (19). Львів. 2010. С. 80–86. <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3164>
- Національний атлас України (2007). НАН України, Інститут географії, Державна служба геодезії, картографії та кадастру; голов. ред. Л. Г. Руденко; голова ред. кол. Б. Є. Патон. 435 с. ISBN 978-966-475-067-4.
- Новікова, О., Паламар, А., & Петьков, С. (2020, April). Операторська служба GNSS мереж України. In *The 12 th International scientific and practical conference "IMPACT OF MODERNITY ON SCIENCE AND PRACTICE"* (13–14 April, 2020). Edmonton, Canada 2020. 678 p. (p. 514). URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XII-Conference-13-14-Edmonton-Canada.pdf>
- Орлюк М. І., Іщенко М. В. (2019а). Аналіз деформації земної поверхні за даними Глобальних Навігаційних Супутникових Систем з її новітніми рухами на території України. *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, 8., 59–68. <https://doi.org/10.15407/dopovid2019.08.059>
- Орлюк, М., & Іщенко, М. (2019б). Сравнительный анализ современной деформации и новейших движений земной поверхности на территории Украины. *Геофизический журнал*, 41(4), 161–181. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177381>
- Третяк К. & Вовк А. (2014). Результати визначення горизонтальних деформацій земної кори Європи за даними ГНСС-спостережень та їх зв'язок з тектонічною будовою. *Геодинаміка*, 2 (13), 5–17. <https://doi.org/10.23939/jgd2014.01.021>
- Українська ГНСС мережа. Головна астрономічна обсерваторія НАН України. URL: <http://gnss.mao.kiev.ua/?q=node/1> (дата звернення: 01.09.2024).
- Brusak, I., & Tretyak, K. (2020, December). About the phenomenon of subsidence in continental Europe in December 2019 based on the GNSS stations data. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2020"* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205717>
- Brusak, I., & Tretyak, K. (2021, October). On the impact of non-tidal atmospheric loading on the GNSS stations of regional networks and engineering facilities. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2021"* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3013>
- Brusak, I., Babchenko, V., Savchuk, N., Marchuk, V., Shkvarok, Y., & Turianytsia, M. (2024). New challenges for exploitation of continuously operating reference GNSS stations during hostilities. Case study of Ukraine. *Geodesy Cartography and Aerial Photography*, (99), 28–37. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.99.028>
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- Davis, J. L., Wernicke, B. P., & Tamisiea, M. E. (2012). On seasonal signals in geodetic time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1). <https://doi.org/10.1029/2011JB008690>
- Desai, S., Bertiger, W., & Gross J. (2016). Introduction to JPL's GPS time series. *California Institute of Technology, under a contract with the National Aeronautics and Space Administration*.
- Devoti, R., D'Agostino, N., Serpelloni, E., Pietrantonio, G. et al. (2017). A combined velocity field of the Mediterranean region. *Ann. Geophys.*, 60, 2, 2–17. <https://doi.org/10.4401/ag-7059>
- Doskich, S. (2021). Deformations of the land crust of the Carpathian region according to the data of GNSS observation. *Geodesy Cartography, and Aerial Photography*, 93(1), 35–41. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.035>
- Doskich, S., Savchuk, S., & Dzhuman B. (2023). Determination of horizontal deformation of the Earth's crust on the territory of Ukraine based on GNSS measurements. *Geodynamics*, 2(35), 89–98. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.089>
- Esposito, A., Pietrantonio, G., Bruno, V., Anzidei, M., Bonforte, A., Guglielmino, F., ... & Serpelloni, E. (2015). Eighteen years of GPS surveys in the

- Aeolian Islands (southern Italy): open data archive and velocity field. *Ann. Geophys.*, 58(4), S0439. <https://doi.org/10.4401/ag-6823>
- GAGE Plate Motion Calculator URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата звернення: 01.09.2024).
- Gruszczynska, M., Klos, A., Rosat, S. and Bogusz, J. (2017). Deriving common seasonal signals in GPS position time series by using Multichannel Singular Spectrum Analysis. *Acta Geodyn. Geomater.*, 14, 3 (187), 273–284. <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0010>
- Ishchenko, M. (2016). Determination of velocities of East European stations from GNSS observations at the GNSS data analysis center of the main astronomical observatory, national academy of sciences of Ukraine. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 32(1), 48–53. <https://doi.org/10.3103/s0884591316010049>
- Ishchenko, M. (2018). Investigation of deformations of the earth crust on the territory of Ukraine using a GNSS observations. *Artificial Satellites*, 53(3), 117–126. <https://doi.org/10.2478/arsa-2018-0009>
- Kowalczyk, K., Kowalczyk, A. M., & Chojka, A. (2020). Modeling of the vertical movements of the earth's crust in Poland with the co-kriging method based on various sources of data. *Applied Sciences*, 10 (9), 3004. <https://doi.org/10.3390/app10093004>
- Khoda O. (2024). Estimation of Velocities of Ukrainian GNSS Stations in the IGB08 Reference Frame. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 40(5), 257–268. <https://doi.org/10.3103/S0884591324050039>
- Maciuk, K., Nistor, S., Brusak, I., Lewińska, P., & Kudrys, J. (2023). Reference clock impact on GNSS clock outliers. *Journal of Applied Geodesy*, 17(4), 391–396. <https://doi.org/10.1515/jag-2023-0007>
- Marchenko, O., Perii S., Lompas O., Holubinka, Yu., Kramarenko, S., & Salawu, A. (2019). Determination of the horizontal strain rates tensor in Western Ukraine. *Geodynamics*, 2(27), 5–15. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.005>
- Naumowicz B., Kowalczyk, K., Pelc-Mieczkowska, R. (2024). PPP solution-based model of absolute vertical movements of the Earth's crust in Poland with consideration of geological, tectonic, hydrological and mineral information. *ESS Open Archive*. <https://doi.org/10.22541/essoar.173046842.26349555/v1>
- Pelc-Mieczkowska, R. (2020). Preliminary Analysis of the Applicability of the GPS PPP Method in Geodynamic Studies. *Geomatics and Environmental Engineering*, 14(4), 57–68. <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.4.57>
- Piña-Valdés, J., Socquet, A., Beauval, C., Doin, M. P., D'Agostino, N., & Shen, Z. K. (2022). 3D GNSS velocity field sheds light on the deformation mechanisms in Europe: Effects of the vertical crustal motion on the distribution of seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(6), e2021JB023451. <https://doi.org/10.1029/2021JB023451>
- 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>
- 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>
- Savchuk, S., & Dосkich, S. (2017). Monitoring of crustal movements in Ukraine using the network of reference GNSS-stations. *Geodynamics*, 2(23), 7–13. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.007>
- Siejka, Z. (2017). Evaluation of integration degree of the ASG-EUPOS polish reference networks with Ukrainian GeoTerrace network stations in the border area. *Artificial Satellites*, 52(3), 71. <https://doi.org/10.1515/arsa-2017-0007>
- Tretyak, K., & Brusak, I. (2020). The research of interrelation between seismic activity and modern horizontal movements of the Carpathian-Balkan region based on the data from permanent GNSS stations. *Geodynamics*, 1(28), 5–18. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.005>
- Tretyak, K., & Brusak, I. (2021). Method for detecting short-term displacements of the Earth's surface by statistical analysis of GNSS time series. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 93(1), 27–34. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.027>
- Tretyak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of Earth crust of territory of Western Ukraine based on "GEOTERRACE" GNSS network data. *Geodynamics*, 1(32), 16–25. <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016>
- Tretyak, K., Brusak, I., Bubniak, I., & Zablotskyi, F. (2021a). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. *Geodynamics*, 2(31), 16–28. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.016>
- Tretyak, K., Korliatovych, T., & Brusak, I. (2021b). Applying the statistical method of GNSS time series analysis for the detection of vertical displacements of Dnister HPP-1 dam. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2021"* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3012>

Kornyliy TRETYAK^{1a}, Ivan BRUSAK^{1b*}, Volodymyr BABCHENKO^{1c}

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12. S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>; ^{1b*} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>, ivan.v.brusak@lpnu.ua; ^{1c} <https://orcid.org/0009-0005-3219-4959>

RECENT DEFORMATIONS OF THE EARTH'S CRUST IN UKRAINE BASED ON GNSS NETWORK DATA FROM GEOTERRACE AND SYSTEM.NET

The paper analyzes the recent trends of horizontal and vertical displacements of Ukraine's territory based on the GeoTerrace and System.Net GNSS network data. This includes the construction of relevant movement maps and the selection of deformation zones of the upper crust. The object of research is horizontal and vertical deformations of the upper crust. The goal is to identify and analyze deformation zones in Ukraine's territory. The source data includes the horizontal and vertical displacement rates of GNSS stations from the GeoTerrace network for 2018 to 2023 and the System.Net network for 2021 to 2023. This data is complemented by known tectonic maps of the territory, sourced from the National Atlas of Ukraine, along with descriptive materials. The methodology includes comparison and analysis of modern deformations of the Earth's crust in the region with its known tectonic structure. New maps of modern horizontal displacement velocities of Ukraine's upper crust have been created, along with vertical displacement velocities of GNSS stations. These studies indicate that the recent horizontal movements within Ukraine are complex and closely linked to the known tectonic structure. Additionally, these movements were compared with regional model values derived from the ITRF-2020 model. Most GNSS stations have vertical subsidence trend, likely due to denudation processes. This study outlines the recent movements of the Earth's crust, however, a detailed interpretation should incorporate additional data from specialists in the Earth sciences. When observed over extended time intervals, the measured velocities of GNSS stations will help identify the spatial distribution characteristics of Earth's crust movement across Ukraine. This, in turn, will facilitate the development of regional geodynamic models for specific tectonic structures or regions, including Ukraine as a whole. Such models hold practical significance for advancing accurate navigation through precise positioning using networks of active GNSS stations.

Keywords: recent geodynamics, deformations of the Earth's crust, horizontal movements of the Earth's crust, vertical movements of the Earth's crust, displacement rates of GNSS stations, GNSS network, GNSS network GeoTerrace, GNSS network SystemNet, Ukraine, Ukrainian Shield, the Carpathians.

Надійшла 18.09.2024 р.