

## СУЧАСНІ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ КОРИ ТЕРИТОРІЇ ЗАХОДУ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ГНСС МЕРЕЖІ «GEOTERRACE»

У роботі проаналізовано сучасні тенденції горизонтальних та вертикальних зміщень території заходу України за ГНСС-даними, включно з побудовою відповідних карт рухів та з виділенням зон деформацій верхнього шару земної кори. Об'єктом дослідження є горизонтальні та вертикальні деформації верхнього шару земної кори. Метою є виявлення та аналіз деформаційних зон на Заході України. Вихідними даними є горизонтальні та вертикальні швидкості 48 ГНСС-станцій з 2018 до 2021 років мережі "Geoterrace" на Заході України, відомі тектонічні карти території та описові матеріали. Методика включає порівняння та аналіз сучасних деформацій земної кори регіону з його відомою тектонічною структурою. У результаті вперше побудовано карти горизонтальних швидкостей ГНСС-станцій та деформацій верхнього шару земної кори Заходу України як єдиного регіону, так само як вертикальних швидкостей ГНСС-станцій. Встановлено, що деформації території Заходу України є складними і лише частково співвідносяться з відомою тектонічною будовою в регіоні. Більшість ГНСС-станцій зазнають висотних просідань, імовірно у зв'язку з денудаційними процесами, але Галицько-Волинська западина практично не просідає. На схилах Українського щита помітна кореляція вертикальних зміщень та глибини залягання поверхні кристалічних порід. Зони стиску виділяються на Закарпатті, що відповідає території Закарпатського глибинного розлому, а також на північному заході регіону. Окремо необхідно виділити регіон довкола міста Хмельницький, де спостерігаються аномальні вертикальні та горизонтальні зміщення. Це геодинамічна інтерпретація аномальних зон деформацій. Визначені швидкості ГНСС-станцій зі збільшенням часового інтервалу спостережень дадуть змогу встановити особливості просторового розподілу руху земної кори на території Заходу України та в майбутньому створити відповідну регіональну геодинамічну модель.

*Ключові слова:* сучасна геодинаміка, деформації земної кори, ГНСС-дані, Захід України

### **Вступ**

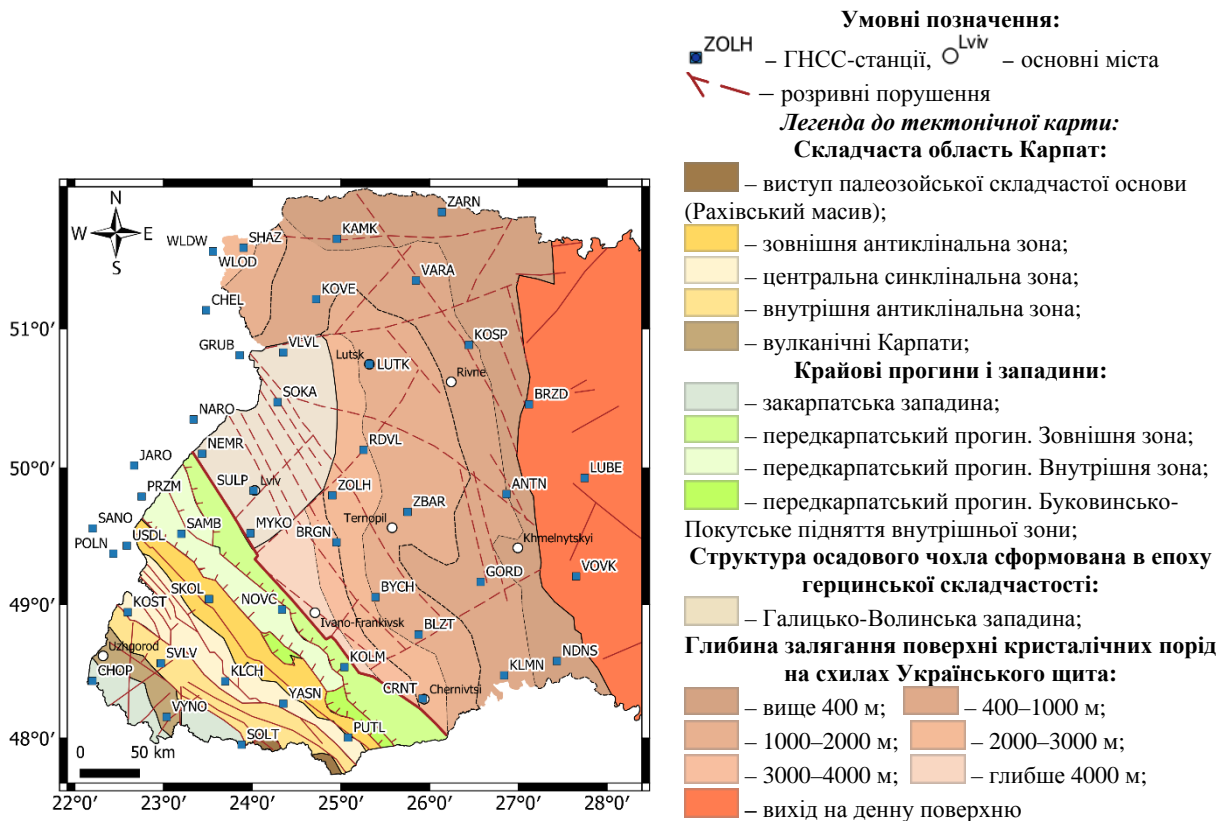
Сьогодні широко використовується оцінка сучасних геодинамічних процесів на основі даних просторово-часових серій ГНСС-станцій. Сучасна геодинаміка території Заходу України як єдиний об'єкт не була до сьогодні дослідженою з використанням ГНСС-даних. Територію Заходу України обмежуємо від західного адміністративного кордону України до виходу на поверхню структур Українського кристалічного щита на сході. Ця територія включає (зі сходу на захід) Українські Карпати, Галицько-Волинську западину, Волино-Подільську плиту, яку показано, як обрамлення Українського щита, тобто зменшення глибини залягання поверхні кристалічних порід на схилах Українського щита (рис. 1) [Круглов та ін., 1985; Чебаненко та ін., 1990; Палиєнко, 1992].

У схемах тектонічного районування Українських Карпат розрізняють три великі структурні одиниці: Складчасті Карпати та прилеглі до них Передкарпатський передовий і Закарпатський внутрішній прогини [Круглов та ін., 1985; Старостенко, 2005; Tretyak, et al., 2015]. З тектонічного погляду складчаста область Карпат поділяється на виступ палеозойської складчастої основи (Рахівський масив); зовнішню антиклінальну зону;

центральну синклінальну зону; внутрішню антиклінальну зону та вулканічні Карпати. Галицько-Волинська западина представлена структурами осадового чохла, сформованими в епоху герцинської складчастості. Глибина залягання поверхні кристалічних порід на схилах Українського щита змінюється у напрямку захід-схід від 4000 м до виходу порід на денну поверхню.

### **Попередні дослідження геодинаміки регіону методами ГНСС**

Цей регіон частково досліджений в межах Європи [Третяк & Вовк, 2014; Ishchenko, 2016], Карпато-Балканського регіону [Tretyak & Brusak, 2020] та повністю в межах території України [Марченко та ін., 2011, 2019; Savchuk & Doskich, 2017; Ishchenko, 2018; Орлюк & Іщенко, 2019, Ishchenko & Khoda, 2020]. Проте, у дослідженнях перелічених вище на території Заходу України представлена незначна кількість ГНСС-станцій, що, враховуючи складну геологічну та тектонічну будову регіону [Круглов та ін., 1985; Палиєнко, 1992], не дозволяє повно відобразити рухи земної кори в межах цих структур. Так у роботах [Марченко та ін., 2011] використано 6 ГНСС-станцій; у [Ishchenko, 2018] – 22 ГНСС-станції; [Savchuk & Doskich, 2017] – 25 ГНСС-станцій.



**Рис. 1.** GNSS-станції на тлі тектонічної карти території Заходу України [за матеріалами Круглов та ін., 1985; Чебаненко та ін., 1990; Палиєнко, 1992]

Позитивною стороною цих досліджень є використання для деяких GNSS-станцій довготривалих часових серій (до 10-ти років), що дозволяє надійно оцінити складові векторів швидкостей, але низька щільність охоплення території, при відстанях між сусідніми станціями 150–250 км, суттєво згладжує деформаційне поле і не дозволяє виявити локальні просторові деформації у межах окремих тектонічних структур.

За останні роки встановлено нові GNSS-станції, також збільшується кількість даних, що дозволяє уточнювати дослідження сучасної геодинаміки регіону.

У межах регіону Заходу України у плані просторової динаміки окремі структури добре досліджені. Здійснена досить детальна оцінка сучасної геодинаміки Українських Карпат та суміжних територій саме GNSS методами [Tretiyak, et al., 2015, Доскіч, 2021]. Доскіч [2021] виділяє активні зони розтягу (Рахів–Верховина та Сянок–Устрики–Долішні) та стиснення (Рахів–Хуст–Мукачеве).

З метою дослідження впливу геодинамічного впливу локальних об’єктів на регіональні деформації територій досліджується геодинаміка великих інженерних об’єктів, наприклад Дністровського гідроенергетичного каскаду [Savchyn & Pronyshyn, 2020, Tretiyak, et al., 2021].

Метою даної статті є максимально детально показати вертикальні та горизонтальні деформації регіону Заходу України, використавши досить густу сітку GNSS станцій.

### Мережа GNSS станцій “Geoterrace”

Для дослідження використано дані GNSS-станцій мережі “Geoterrace” (<https://geoterrace.lpnu.ua>) та станцій, розташованих на території Польщі вздовж кордону з Україною. Ці GNSS-станції входять у польські мережі ASG EUPOS (<http://www.asgeupos.pl>) і TPI NET pro (<https://tpinet.pl>), з якими налагоджений обмін даними (див. рис. 1) [Siejka, 2017]. Створення мережі “Geoterrace” розпочалося у 2007 році у Львівській області, а сьогодні діють 72 GNSS-станції, що утворюють рівномірну мережу, яка практично повністю охоплює 12 областей України.

Метою створення мережі Geoterrace є забезпечення користувачів у режимі реального часу диференційними поправками для прецизійного визначення місцеположення, а також моніторингу просторових зміщень земної кори та стабільності великих інженерних об’єктів (гідроелектростанцій, гідроакумулюючих електростанцій, атомних електричних станцій) та деформацій охоплених ними територій. Управління мережею Geoterrace у режимі реального часу виконується за допомогою комплексного програмного забезпечення Sino GNSS CDC.NET. Для геодинамічних досліджень обчислення добових розв’язків GNSS-станцій у пост-процесингу здійснюється за допомогою програмного забезпечення Bernese GNSS Software [Dach et al., 2015].

Відстань між сусідніми GNSS-станціями мережі “Geoterrace” становить у середньому 70 км, що

є ефективним для диференціації сучасної геодинаміки охоплених мережею територій.

Виходячи з досвіду опрацювання ГНСС вимірів, проведених різними дослідниками при тривалості вимірів на ГНСС-станції більше 2,5 років точність визначення вертикальних швидкостей знаходиться 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 скорочення тривалості вимірювань до одного-двох років погіршує точність визначення швидкості до 1–2 мм/рік і більше [Cenni et al., 2013; Esposito et al., 2015; Devoti et al., 2017]. Крім цього, на точність та достовірність визначення швидкостей рухів земної кори мають важливе значення стабільність та безперервність добових розв’язків, тобто відсутність стрибкоподібних зміщень та прогалів у часовій серії. З цих причин для виконання досліджень нами відібрано з 72-х ГНСС станцій тільки 48 станцій, оскільки часові серії решти станцій мають тривалість, меншу за 2,5 роки.

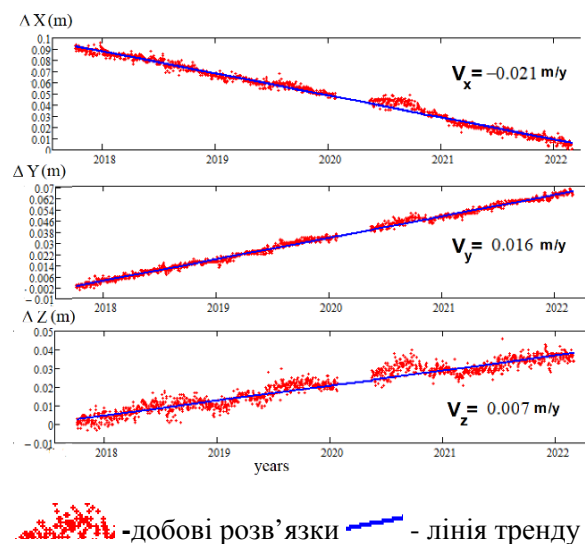
Обчислення добових координат ГНСС-станцій здійснено у програмному забезпеченні Bernese GNSS Software [Dach et al., 2015]. За референції ГНСС-станції обрано станції мережі IGS за межами Заходу України. Результатом обчислень є мережеве рішення за стратегією подвійних різниць. Геоцентричні координати X, Y, Z ГНСС-станцій визначені у системі ITRF-2014. Зміщення ГНСС-станцій  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  визначені відніманням координат станції на поточну епоху від координат на першу епоху.

Далі обчислення даних проводили за такою методикою. Каталог щоденних рішень з Bernese GNSS Software був експортований в MathCAD. Для аналізу даних використовувався спеціально розроблений код. Вертикальні стрибки в часовому ряді видалялися вручну та за допомогою простого фільтра (відходження від загального тренда більше 1 см). Варто зазначити, що вилучені дані за 3-річний період становили лише 0,1–0,2 %. Загалом дані були хорошої якості. У цьому дослідженні розкладання часових рядів не проводилося, а трендом є середнє значення з ряду. Не є чітко зрозумілим, як визначити сезонність, шум та інші компоненти для цього часового ряду. Прикладом може бути зафіксований вплив неприливної атмосферного навантаження (NTAL) на часові ГНСС-ряди у цьому регіоні [Tretuyak et al., 2021]. Відомо, що конвенції Міжнародної служби обертання Землі (IERS) рекомендують враховувати змодельовані деформації в програмних продуктах, викликані приливними навантаженнями до часових ГНСС-рядів. У той же час, 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 проводили розкладання часових рядів на складові.

### Аналіз часових серій мережі активних ГНСС станцій «Geoterrace»

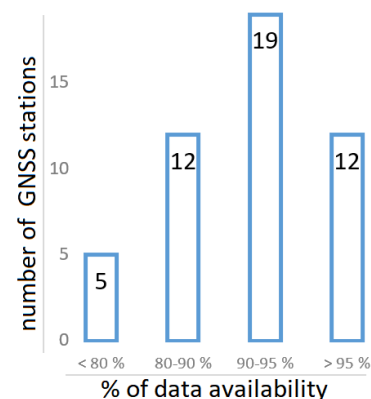
При аналізі часових серій перш за все врахована заміна антени для таких станцій: KOST, SOKA, SHAZ. У деяких рядах ГНСС-станцій встановлено розриви даних, що пов’язано з технічними проблемами з обладнанням чи зв’язком. До таких станцій на території Заходу України належать такі: BRZD, KLMN, NEMR, SAMB, SHAZ, SULP, YASN. Для прикладу, на рис. 2 показані просторово-зміщення ГНСС-станції SULP по геоцентричних осях X, Y, Z системи координат ITRF-2014.

Зміщення  $\Delta Z$  по осі Z мають сезонні відхилення [Третяк та ін., 2012; 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, яка наведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Просторово-часові ряди зміщень ГНСС станції SULP у системі координат ITRF-2014

На рис. 3 представлена гістограма цілісності даних використаних ГНСС-станцій.



**Рис. 3.** Цілісність даних ГНСС-станцій з 2018 по 2021 рік у відсотках

З рис. 3 видно, що більшість ГНСС-станцій має відсоток цілісності даних у межах 90–95 %, що відповідає  $\approx 1000$  добовим розв'язкам. Тільки 5 ГНСС-станцій мають відсоток цілісності даних менше 80 %, що відповідає  $\approx 850$ – $900$  добовим розв'язкам. У середньому наявність добових розв'язків для 48 ГНСС-станцій становить 90 %, що є високим і водночас достатнім показником для аналізу геодезичних зміщень території Заходу України.

Для визначення відносних векторів швидкостей з вилученими складовими руху Євразійської тектонічної плити отримані зміщення  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  у геоцентричній системі (ITRF-2014) переобчислено систему ETRF-2000 та перетворено у топоцентричну систему координат.

У табл. 2 приведені обчислені річні швидкості  $V_N$  (напрямок на північ),  $V_E$  (напрямок на схід) та  $V_H$  (напрямок по висоті) відібраних ГНСС-станцій та оцінка їх точності.

Таблиця 2

**Компоненти векторів лінійних річних швидкостей ГНСС-станцій та оцінка їх точності (ETRF-2000)**

ГНСС-станція	Річні швидкості, мм/рік			СКП річних швидкостей, мм		
	$V_N$	$V_E$	$V_H$	$V_N$	$V_E$	$V_H$
1	2	3	4	5	6	7
ANTN	-2,1	-2,2	-4,9	0,2	0,1	0,2
BLZT	0,1	0,4	-7,8	0,1	0,1	0,2
BRGN	-0,1	-0,5	-0,7	0,1	0,0	0,1
BRZD	-2,4	-1,7	-15,1	0,5	0,2	0,6
BYCH	0,1	0,3	-7,2	0,2	0,1	0,2
CHEL	-0,4	-0,6	-0,4	0,1	0,0	0,1
CHOP	-0,5	0,8	-2,2	0,2	0,1	0,2
CRNT	0,3	0,4	-7,2	0,1	0,1	0,2
GORD	0,7	0,3	-4,5	0,2	0,1	0,2
GRUB	-0,1	-0,2	-2,0	0,1	0,1	0,1
JARO	0,1	-0,1	-2,9	0,1	0,1	0,1
KAMK	-0,2	-1,0	-4,6	0,1	0,1	0,1
KLCH	0,1	-0,1	-6,3	0,1	0,1	0,1
KLMN	-0,4	0,6	-6,2	0,2	0,1	0,2
KOLM	0,6	0,7	-3,3	0,1	0,1	0,2
KOSP	0,7	0,6	-5,1	0,2	0,1	0,2
KOST	1,1	0,6	1,0	0,2	0,1	0,2
KOVE	0,2	-0,1	-5,7	0,1	0,1	0,1
LUBE	2,3	1,7	-16,5	0,5	0,4	0,5
LUTK	0,1	0,3	-5,6	0,1	0,1	0,2
MYKO	-0,2	-0,9	-1,4	0,1	0,0	0,1
NARO	-0,4	-0,3	-2,3	0,1	0,1	0,1
NDNS	0,2	1,3	-6,7	0,6	0,4	0,7
NEMR	0,4	-	-1,2	0,1	0,1	0,1
NOVC	-0,1	0,2	-2,8	0,2	0,1	0,2
POLN	-0,7	-0,6	-1,4	0,2	0,1	0,2
PRZM	0,9	1,8	1,1	0,1	0,1	0,1
PUTL	0,7	-0,3	-7,1	0,2	0,1	0,2
RDVL	0,2	-0,1	-1,3	0,1	0,1	0,1
SAMB	0,1	-0,1	-1,6	0,1	0,0	0,1
SANO	0,3	0,4	-7,5	0,2	0,1	0,2
SHAZ	-1,3	2,9	8,4	0,1	0,1	0,1
SKOL	-0,1	-0,0	-1,1	0,1	0,0	0,1
SOKA	0,2	-0,2	-0,7	0,1	0,1	0,1
SOLT	-0,4	0,6	-5,1	0,1	0,1	0,2
SULP	0,2	-0,4	-1,2	0,1	0,0	0,1
SVLV	-0,7	-0,3	-5,6	0,1	0,1	0,1
USDL	0,4	0,3	-2,3	0,1	0,1	0,1

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
VARA	0,6	-0,3	-6,4	0,1	0,1	0,2
VLVL	0,0	-0,6	-1,3	0,1	0,0	0,1
VOVK	0,2	1,4	-4,3	0,4	0,3	0,4
VYNO	0,3	0,1	-6,3	0,1	0,1	0,1
WLDW	0,1	-0,3	-1,2	0,1	0,0	0,1
WLOD	-0,1	0,2	-2,1	0,1	0,1	0,1
YASN	0,6	-0,1	-5,3	0,2	0,1	0,2
ZARN	-0,1	0,7	-6,8	0,2	0,1	0,2
ZBAR	0,7	-0,2	-7,0	0,1	0,1	0,2
ZOLH	-0,8	-0,2	-1,8	0,1	0,0	0,1
Макс	2,3	2,9	8,4	0,6	0,4	0,7
Мін	-2,4	-2,2	-16,5	0,1	0,0	0,1
Сер.	0,1	0,0	-5,2	0,1	0,1	0,2

У цілому в розглянутому регіоні в середньому горизонтальні швидкості станцій взаємокомпенсуються. Максимальна річна швидкість у напрямку на північ становить 2,3 мм/рік для станції LUBE, а на південь – 2,4 мм/рік для станції BRZD. Максимальна річна швидкість у напрямку на схід становить 2,9 мм/рік для станції SHAZ, а на захід – 2,2 мм/рік для станції ANTN.

Вертикальні швидкості у розглянутому регіоні є від'ємними, у середньому для усіх ГНСС-станцій швидкість просідань становить 5,2 мм/рік. Максимальні просідання характерні для станції LUBE (16,5 мм/рік), BRZD (15,1 мм/рік).

За даними табл. 2 побудовані карти сучасних вертикальних і горизонтальних рухів верхнього шару земної кори на Заході України.

**Сучасні вертикальні рухи території Заходу України**

На рис. 4 показані вертикальні вектори швидкостей ГНСС-станцій мережі "Geoterrace". З метою виділення загальних тенденцій на основі вертикальних швидкостей здійснено їх інтерполявання у виді ізоліній швидкостей.

З рис. 4 видно, що поле вертикальних швидкостей має від'ємні значення у межах від -1 до -16 мм/рік і вся територія зазнає просідання у часі. У середньому для усіх ГНСС станцій швидкість просідань становить -5 мм/рік, що може пояснюватися проявами денудаційних процесів у регіоні. Лише одна станція PRZM піднімається з незначною швидкістю (+1 мм/рік), що може бути пов'язано з особливостями її геологічного району розташування чи встановлення, оскільки в цілому для цього регіону Польщі відзначаються просідання до -3 мм/рік [Kowalczyk, 2005; Kowalczyk & Rapiński, 2017].

На території Заходу України просідання не є рівномірними, а можуть бути регіонально диференційовані на зони: східну (вихід Українського щита на денну поверхню), південну (Закарпаття), північну (Волинь) та зону Галицько-Волинської западини.

Найменших просідань зазнає Галицько-Волинська западина (-1 мм/рік), сформована в епоху герцинської складчастості. Відзначимо, що у цьо-

му регіоні виділяють Львівську регіональну магнітну аномалію [Орлюк & Роменец, 2005, Нечаєва та ін., 2002; Третяк та ін., 2015; Анікеєв та ін., 2019], джерелом якої може бути намагнічений блок земної кори на глибині 40–55 км [Орлюк, 1999]. Ймовірним механізмом для інтерпретації тектономагнітної аномалії є п'єзомагнітний ефект, тобто реакція магнітних неоднорідностей на варіації тектонічних напружень у земній корі [Третяк та ін., 2015]. З іншого боку аномально низькі значення опускання в Галицько-Волинській западині імовірно можна пояснити наявністю тут теплової аномалії (Рава-Русько–Крехівська, тепла аномалія, де геотермічний градієнт досягає 2,25 °C/100 м) [Крупський та ін., 2014]. Високий геотермічний

градієнт пов'язаний з глибокими розломами, що є частиною зони Тейсейра–Торнквіста.

На схід та на північ від Галицько-Волинської западини інтенсивність щорічних просідань зростає. Особливо це помітно у напрямку захід–схід від -1 мм/рік на Галицько-Волинській западині до -16 мм/рік на поверхні Українського щита. У цілому ці зміщення корелюють зі зменшенням глибини залягання поверхні кристалічних порід на схилах Українського щита. У цьому плані аномальним є регіон довкола міста Хмельницький, який співпадає з аномальною від'ємною регіональною компонентою аномального магнітного поля на території Заходу України [Нечаєва та ін., 2002; Орлюк & Роменец, 2005].

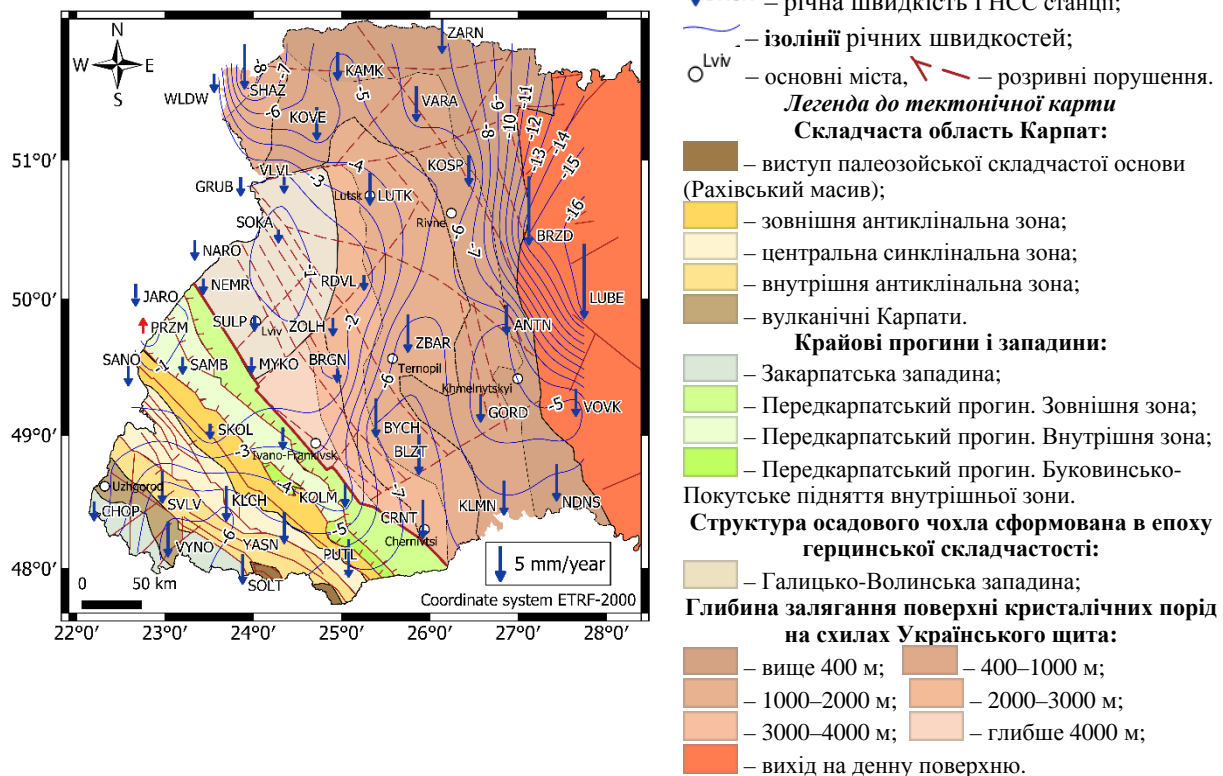


Рис. 4. Вертикальні зміщення на території Заходу України за ГНСС-даними з 2018 по 2021 роки

На рис. 5 показано регіональну компоненту аномального магнітного поля у нанотеслах на території Заходу України

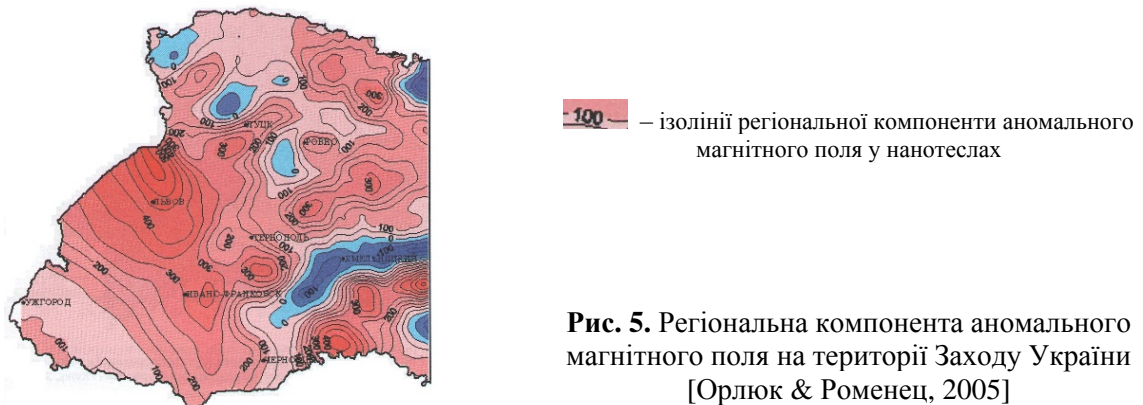


Рис. 5. Регіональна компонента аномального магнітного поля на території Заходу України [Орлюк & Роменец, 2005]



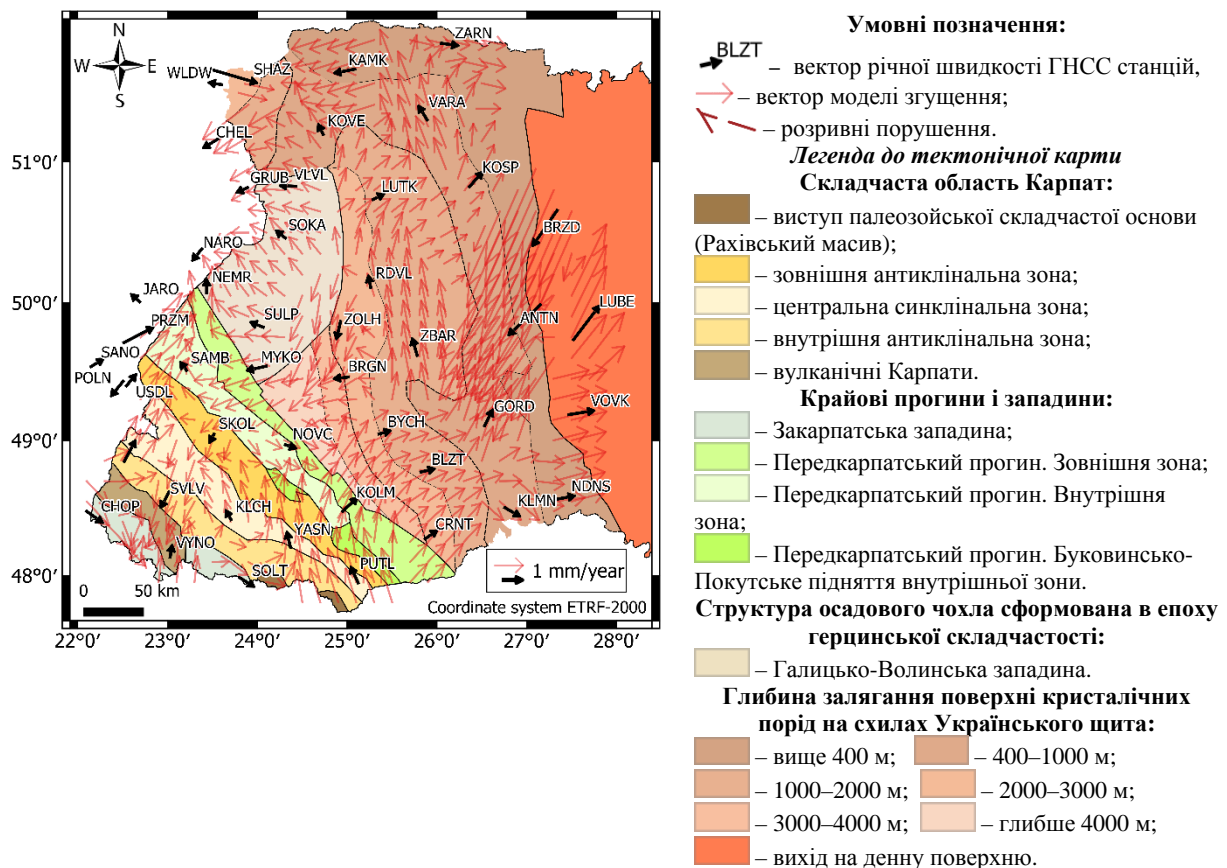
### Сучасні горизонтальні рухи та деформації на Заході України

На рис. 6 показана згущена векторна модель горизонтальних зміщення земної кори у системі координат ETRF-2000 на території Заходу України за даними ГНСС станцій з 2018 по 2021 роки.

Величина горизонтальних швидкостей ГНСС станцій максимально досягає 30 мм/рік. Горизонтальні зміщення на території заходу України є різнонаправленими. Це насамперед пов'язано з наявністю багаточисельних давніх розломів та леніаментів у верхній частині земної кори. Такі розривні порушення, а також складна тектонічна будова

регіону трансформують єдиний напрям горизонтальних рухів у різнонаправлений.

З рис. 6 видно, що загальна картина векторного поля руху диференціюється на окремі блоки. Виділяється динаміка спільного руху станцій PUTL, YASN, KOLM, BYCH, BLZT, які утворюють вихревий горизонтальний рух попри поперечне простягання структур Карпат. Потрібно зауважити, що ГНСС-станції GORD, BLZT, BYCH рухаються назустріч станціям ANTN, BRZD (до 30 мм/рік), це може бути проявом насуву. Менші насувні рухи (до 15 мм/рік) також наявні на Закарпатті у зоні Закарпатського розлому (між станціями SVLV та VYNO).



**Рис. 6.** Згущена векторна модель горизонтальних зміщення земної кори у системі координат ETRF-2000 на території Заходу України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки

Для узагальнення деформацій, територія Заходу України була розбита на окремі трикутники триангуляцією Делоне. Вершинами суміжних трикутників були ГНСС-станції. Для центрів трикутників знайдено параметри деформації земної кори: дилатацію  $\Delta$ , максимальний стиск чи розтяг по головних осях  $E_1$   $E_2$  та  $\Theta$  – азимут головної півосі деформації. Далі параметри інтерпольовано на регулярну сітку.

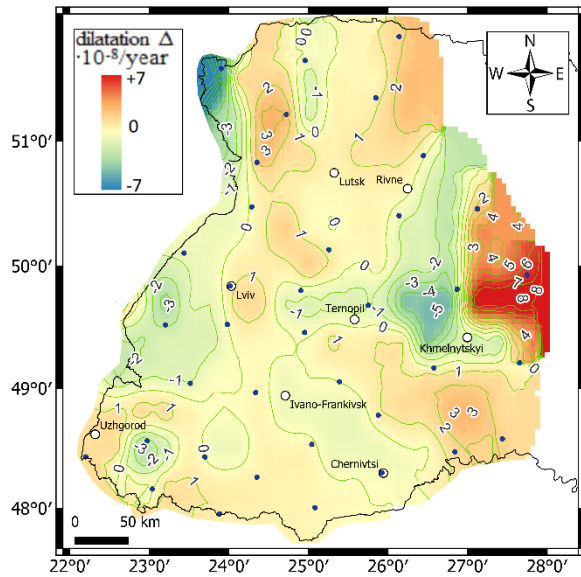
На рис. 7 наведена карта розподілу дилатації земної кори на території Заходу України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки.

Загальна дилатація з 2018 по 2021 роки знаходяться в межах від  $-10^{-9}$ /рік до  $+8 \cdot 10^{-8}$ /рік. Аналі-

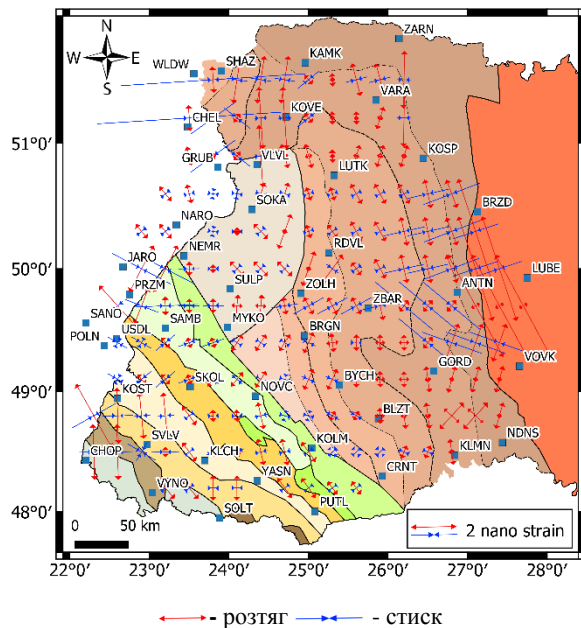
зуючи рис. 7, 8 можемо виділити декілька аномальних зон деформації земної кори.

На рис. 8 показано стиск та розтяг ділянок земної кори Заходу України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки.

Найбільша зона стиску відзначається на півночному заході регіону в районі станції SHAZ, менший стиск також присутній в районі стику Галицько-Волинської западини та крайових прогинів Українських Карпат. Така динаміка підтверджується у дослідженнях сусідніх регіонів Польщі [Araszkiewicz, et al., 2016; Kowalczyk, 2020].



**Рис. 7.** Розподіл дилатація на території Заходу України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки



**Рис. 8.** Стиск та розтяг ділянок земної кори Заходу України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки

Зона стиску на Закарпатті відповідає території між станціями SVLV та VYNO (див. рис. 7, 8). Цей регіон співпадає з зоною Закарпатського розлому підвищеної сейсмічності, а також відзначається підвищеною густиною теплового потоку Карпатського регіону, ( $100 \text{ мВт/м}^2$ ) [Maksymchuk et al., 2018; Kutas, 2021].

Деформаційними є рухи регіону довкола міста Хмельницький. Стиск та розтяг помітні у регіоні, де ГНСС-станції GORD, BLZT, BYCH рухаються назустріч станціям ANTN, BRZD (див. рис. 6). З рис. 7 видно, що цій зоні відповідає стиск, значення дилатації становить до  $\Delta = -5 \cdot 10^{-8}$  та відпо-

відний розтяг східніше до  $\Delta = 8 \cdot 10^{-8}$ . Розподіл горизонтальних зміщень дає змогу припустити про наявність насувних елементів. Також ми раніше зазначали, що регіон має аномальну висотну динаміку. Зазначимо, що в цьому регіоні вчені [Нечаєва та ін., 2002; Орлюк & Роменец, 2005] виділяють від’ємну регіональну компоненту аномального магнітного поля на території Заходу України. Причиною цьому можуть слугувати давні розломи, що простягаються на північ–південь у регіоні [Палиєнко, 1992], які і розділяють зони стиску та розтягу.

Метою цієї статті не стоїть детальний аналіз причин деформацій земної кори, а ставиться задача максимально детально показати вертикальні та горизонтальні деформації регіону Заходу України, використавши досить густу сітку ГНСС станцій. Виконані дослідження показують, що геодинаміка регіону є значно складнішою ніж приведена у роботах [Ishchenko, 2018; Доскіч 2021]. У подальшому для аналізу відзначених зон деформацій варто перейти до детальніших карт з використанням додаткових даних геологічної та геофізичної розвідки.

### Висновки

1. За даними проведених досліджень встановлено і проаналізовано сучасні вертикальні та горизонтальні рухи на Заході України за даними ГНСС-станцій з 2018 по 2021 роки. Для дослідження взято просторово-часові ряди 48 ГНСС-станцій, що дозволяє гарантувати умовно рівномірне покриття території дослідження з середньою відстанню між станціями близько 70 км. Встановлено, що геодинаміка регіону є складною, сучасні рухи не можна пояснити локальними рухами тектонічних одиниць у регіоні.

2. Побудована карта ізоліній та векторів вертикальних зміщень ГНСС-станцій дозволяє відзначити, що більшість ГНСС станцій зазнають просідань, імовірно в зв’язку з денудаційними процесами, а Галицько-Волинська западина практично не просідає. Ця територія умовно співпадає з Львівською регіональною магнітною аномалією [Орлюк & Роменец, 2005, Нечаєва та ін., 2002; Третяк та ін., 2015]. Імовірним механізмом для інтерпретації тектономагнітної аномалії є п’езомагнітний ефект, тобто реакція магнітних неоднорідностей на варіації тектонічних напружень у земній корі [Третяк та ін., 2015]. Тому можемо припустити, що ймовірним є відображення цього механізму у вертикальній геодинаміці регіону.

Виявлено, що у напрямку захід–схід починаючи від структур Галицько-Волинської западини до поверхні Українського щита величина від’ємних вертикальних зміщень ГНСС-станцій зростає (від  $-1 \text{ мм/рік}$  до  $-16 \text{ мм/рік}$ ). У цілому ці зміщення корелюють зі зменшенням глибини залягання поверхні кристалічних порід на схилах Українського щита: від глибини 4000 м до виходу на кристалічних порід на денну поверхню.

3. На побудованих картах горизонтальних деформацій та зміщень земної кори та розподілу параметрів деформацій на території Заходу України за даними ГНСС станцій з 2018 по 2021 роки, відзначаються дві зони стиску: одна на Закарпатті, що відповідає території Закарпатського глибинного розлому, а інша – на північному заході регіону, в районі станції SHAZ.

4. На стику Галицько-Волинської западини та крайових прогинів Українських Карпат проявляється горизонтальний стиск ( $\Delta = -3 \cdot 10^{-8}$ ) та просідання території до  $-2$  мм/рік. Це співвідноситься зі схожою динамікою сусідніх регіонів Польщі [Kowalczyk, 2005, 2020; Araszkiwicz, 2016].

5. Окремо необхідно виділити регіон довкола міста Хмельницький де, спостерігаються аномальні вертикальні та горизонтальні зміщення. Стиск помітний у регіоні, де ГНСС-станції GORD, BLZT, ВУСН рухаються назустріч станціям ANTN, BRZD, а розтяг – на схід від цього регіону. У цілому цій зоні відповідає стиск, значення дилатації становить до  $\Delta = -5 \cdot 10^{-8}$  та відповідний розтяг східніше до  $\Delta = +8 \cdot 10^{-8}$ . Відзначимо, що в цьому регіоні [Нечасва та ін., 2002; Орлюк & Роменец, 2005] виділяють від'ємну регіональну компоненту аномального магнітного поля на території Заходу України. Причиною цьому можуть слугувати давні розломи, що простягаються на північ–південь у регіоні [Палиєнко, 1992], які розділяють зони стиску та розтягу.

6. Результати досліджень показують, що деформації території Заходу України є складними. У подальшому для аналізу відзначених зон деформацій варто перейти до детальніших карт з використанням додаткових даних геологічної та геофізичної розвідки.

#### Список літератури

- Araszkiwicz A., Figurski M. & Jarosiński M. (2016). Erroneous GNSS Strain Rate Patterns and their Application to Investigate the Tectonic Credibility of GNSS Velocities. *Acta Geophys.* 64, 1412–1429. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0057>.
- Cenni N., Baldi P., Loddo F., Casula G. et al.: (2013) Present-Day vertical kinematic pattern in the central and northern Italy from permanent GPS stations. Conference: Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, 18–21 Novembre 2013, Trieste, vol. 2.
- Dach R., Lutz S., Walser P. & Fridez P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2.
- 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).
- Desai S., Bertiger W., Gross J. et al. (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. DOI: 10.4401/ag-7059.
- Doskich S. (2021). Deformations of the land crust of the Carpathian region according to the data of GNSS observation. *Cartography, and Aerial Photography*, 93(1), 35–41. <https://doi.org/10.23939/istecap2021.93.035>.
- Esposito A., Pietrantonio G., Bruno V., Anzidei M. et al.: (2015) Eighteen years of GPS surveys in the Aeolian Islands (southern Italy): Open data archive and velocity field. *Ann. Geophys.*, 58, 4, 2–12. DOI: 10.4401/ag-6823.
- 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. DOI: 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. Doi: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. DOI: 10.2478/arsa-2018-0009.
- Ishchenko M. & Khoda O. (2020, December). On GNSS Activity at the Main Astronomical Observatory NASU. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020» (Vol. 2020, No. 1. Pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Kowalczyk K. & Rapiński J. (2017). Robust network adjustment of vertical movements with GNSS data <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.3>.
- Kowalczyk K. (2005, May). Determination of land uplift in the area of Poland. In the 6th International Conference Environment, al Engineering (Vol. 1. Pp. 903–907).
- 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.
- Kutas R. I. (2021). Deep degasation and oil-and-gas containment of the Eastern (Ukrainian) Carpathians: geodynamic and geothermal aspects. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(6), 23–41.
- Maksymchuk V., Klymkovych T., Nakalov Y., Chobotok I., Tymoschyk V. (2018) Informativity of tectonomagnetic monitoring in the Transcarpathians active seismic zone. XII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Kyiv, Ukraine. DOI:10.3997/2214-4609.201803170.



- Savchuk S. & Doskich S. (2017). Monitoring of crustal movements in Ukraine using the network of reference GNSS-stations. *Scientific journal "Geodynamics"*, 2(23), 7–13.
- Savchyn I. & Pronyshyn R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dnister Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11 (5), 391–400.
- 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.
- 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. 1(28), 5–18. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.005>.
- Tretyak K., Brusak I., Bubniak I. & Zablotskyi F. (2021). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. 2(31), 16–28. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.016>.
- Анікеєв С., Максимчук В., Пилип'як М. (2019) Гравімагнітна модель Коломийської палеодоліни уздовж геотраверсу Надвірна–Отинія–Івано-Франківськ. *Геофізичний журнал*, 73–92.
- Круглов С. С., Смирнов С. Е., Спитковская С. М., Фильштинский Л. Е., Хижняков А. В. (1985). *Геодинамика Карпат / К.: Наук. Думка*.
- Крупський Ю. З., Куровець І. М., Сеньковський Ю. М., Михайлов, В. А., Чепіль П. М., Дригант Д. М. & Бодлак В. П. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України.
- Марченко О. М., Третяк К. Р., Серант О. В. & Висотенко Р. О. (2011). Оцінювання тензора швидкостей деформацій земної кори за даними GPS-спостережень у Східній Європі. *Геодинаміка*, 5–16. <https://doi.org/10.23939/jgd2011.01.005>.
- Марченко О., Перій С., Ломпас О., Голубінка Ю., Марченко Д., Крамаренко С. & Salawu A. (2019). Визначення тензора швидкостей горизонтальних деформацій в Західній Україні. *Геодинаміка*, 5–15. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.005>.
- Нечаєва Т. С., Гаркавко В. М., Шимків Л. М. & Єнтін В. А. (2002) Карта аномального магнітного поля України: ПДРГП "Північукргеологія".
- Орлюк М. & Роменец А. (2005). Новый критерий оценки пространственно-временной возмущенности магнитного поля Земли и некоторые аспекты его использования. *Геофизич. журн.*, 27(6), 1012–1023.
- Орлюк М. (1999). Магнитная модель земной коры югозапада Восточно-Европейской платформы. *Ин-т геофизики НАН Украины*.
- Орлюк М. & Ищенко М. (2019). Сравнительный анализ современной деформации и новейших движений земной поверхности на территории Украины. *Геофизический журнал*.
- Палиенко В. (1992). Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. Киев: "Наукова думка", 1992. 116 с.
- Старостенко В. І. (Ed.). (2005). Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. *Наукова думка*.
- Третяк К. & Вовк А. (2014) Результати визначення горизонтальних деформацій земної кори Європи за даними ГНСС-спостережень та їх зв'язок з тектонічною будовою. *Геодинаміка*, 16. No. 1. 21–33. <https://doi.org/10.23939/jgd2014.01.021>.
- Третяк К. Р., Максимчук В. Ю., Кутас Р. І., Рокитянський І. І., Гнилко О. М., Кендзера О. В., Пронишин Р. С., Климович Т. А., Кузнєцова В. Г., Марченко Д. О., Смірнова О. М., Серант О. В., Бабак В. І., Вовк А. І., Романюк В. В., Терешин А. В. (2015) Львів: Видавництво Львівської політехніки. 420 с.
- Третяк К. Р., Смірнова О. М., Бределева Т. М. (2012). Дослідження періодичних змін висотного положення супутникових перманентних станцій світу. *Геодинаміка*, (1), 11–29.
- Чебаненко І. І., Вишняков І. Б. & Власов Б. І. (Ред.) (1990) *Геотектоника Вольно-Подоліи*. – *Наук. Думка*.

Kornyliy TRETYAK<sup>a</sup>, Ivan BRUSAK<sup>b</sup>

Department of High Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, <sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>.

#### MODERN DEFORMATIONS OF EARTH CRUST OF TERRITORY OF WESTERN UKRAINE BASED ON «GEOTERRACE» GNSS NETWORK DATA

The work analyzes the current horizontal and vertical displacements territory of western Ukraine according to GNSS data, including the creation of special maps of modern displacements and the allocation of deformation zones of the upper crust. The object of study is the horizontal and vertical deformations of the upper crust. The aim is to identify and analyze deformation zones in Western Ukraine. The initial data are horizontal and vertical velocities of 48 continuous GNSS stations from 2018 to 2021 of Geoterrace network, known tectonic maps of the territory and descriptive materials. The methods include comparison and analysis of modern Earth crust deformations of the region with its known tectonic structure. As a result, for the first time maps of horizontal velocities of continuous GNSS stations and deformations as well as vertical velocities of GNSS stations of the upper crust of Western Ukraine as a whole region are created. It is established that the deformations of the territory of Western Ukraine are complex and only partially correlate with the known tectonic structure in the region. Most of continuous GNSS stations subside in vertical component, possible due to denudation processes, but the Galicia–Volyn depression practically does not subside. On the slopes of the Ukrainian Shield there is a noticeable correlation of vertical displacements and the depth of the surface of crystalline rocks. Zones of compression are identified in Zakarpattia, which corresponds to the Zakarpathian (Transcarpathian) deep fault, and in the north-west of the region. It is necessary to mark the zone around the city of Khmelnytskyi, where abnormal vertical and horizontal displacements are observed. Geodynamic interpretation of anomalous deformation zones is given. Determined velocities of continuous GNSS stations with the increasing time interval of observations will make it possible to establish the features of the spatial distribution of crustal movement of territory of Western Ukraine as well as create an appropriate regional geodynamic model in the future.

*Key words:* modern geodynamics, deformations of the Earth crust, GNSS data, Western Ukraine.

Надійшла 12.03.2022 р.