

ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ КОРИ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ ЗА ДАНИМИ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Поява супутникових геодезичних спостережень ознаменувалася їх широким використанням для визначення швидкостей і спрямованості горизонтальних рухів літосферних плит (сучасної кінематики літосферних плит), що дозволило вивчати деформаційні процеси на глобальному та регіональному рівнях. Сьогодні постійно діючими GNSS-станціями покрита значна частина території суші. Оскільки багато з цих станцій накопичили великий обсяг щоденних вимірювань за період до 20 років, з'являється можливість відстежити деформаційні процеси певних територій. Звісно ж, залишається проблема правильної ідентифікації результатів спостережень за істинними параметрами деформаційного процесу. Це питання потребує спільної роботи геофізиків та геодезистів. Але високоточні часові ряди координат і значення швидкостей зміщень GNSS-станцій є важливими і перспективними даними для інтерпретації геодинамічних процесів, отримання яких є набагато простішим, ніж геофізичні чи геологічні дані, не потребує спеціальних затрат, і, що теж важливо – активно розвивається, тобто кількість таких станцій стрімко збільшується. Сьогодні за неофіційними даними на території України працює вже більше 300 референціальних станцій. Їхня мета – виявити деформації земної кори на території Карпатської складчастої системи за допомогою GNSS-технології. Вхідними даними для дослідження послужили результати спостережень тривалістю вісім років (2013–2020 р.) на референціальних станціях України (мережа ZAKPOS). З цих спостережень за допомогою наукового програмного забезпечення GAMIT/GLOBK обчислено об'єднаний у часі розв'язок (часові ряди координат та швидкості змін координат). За отриманими даними також було побудовано вектори горизонтальних зміщень GNSS-станцій та обчислено деформації земної кори методом трикутників, вершинами яких є GNSS-станції, за допомогою програмного забезпечення «GPS Triangle Strain Calculator». Обчислені значення деформацій показали різну геодинамічну картину, залежно від розташування трикутників. Зокрема, було виділено активні зони розтягу (Рахів–Верховина та Сянок–Устрики-Долішні) та стиснення (Рахів–Хуст–Мукачеве). Результати проведених досліджень дають змогу встановити особливості просторового розподілу руху земної кори в Карпатському регіоні та в майбутньому при спільній інтерпретації з геофізичними даними створити регіональну геодинамічну модель Карпатської складчастої системи.

Ключові слова: GNSS, референціальні GNSS-станції, деформації земної кори, GAMIT/GLOBK.

Вступ

Територія України знаходиться на двох основних тектонічних структурах – Східноєвропейській платформі та Середземноморському рухливому поясі. Основними тектонічними структурами поясу є Карпатська складчаста система, складчасто-брилова споруда гірського Криму та Чорноморська западина. Карпатська складчаста система є складовою Альпійської складчастої області. Система включає в себе три великі структурні одиниці: Складчасті Карпати, Передкарпатський передовий і Закарпатський внутрішній прогини. Карпатський регіон сьогодні є найбільшою зоною сейсмічної активності на території України. У регіоні можливі землетруси силою 6–8 балів за 12-бальною міжнародною шкалою. Найбільш сейсмічно активною частиною регіону є Закарпаття. Геодинамічні та сейсмопрогностичні дослідження з застосу-

ванням різних геофізичних методів (сейсмічних, геоакустичних, магнітометричних, геоелектричних) в Карпатському регіоні України вже понад 40 років ведуться львівськими геофізиками [Вербицький та ін., 2011; Malytskuu, et al., 2000; Вербицький Т. та ін., 2002; Вербицький та ін., 2005; Назаревич А. В. та ін., 2012; Назаревич Л. Є. та ін., 2012]. Геодинаміка Карпатського регіону також досліджена різними геодезичними методами, зокрема, співробітниками інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка” [Savchuk, et al., 2017; Tretyak, et al., 2016; Tretyak, et al., 2018] прокладено загальнорегіональний профіль повторного нівелювання 1-го класу через Карпати, Закарпаття і Передкарпаття, два субрегіональні профілі 1-го класу – в Закарпатті; створено два локальні комплексні геодезичні полігони на південних схилах Карпат (триангуляція, трилатерація, світловіддалемірні та GNSS-дослідже-

ння) та проводяться опрацювання спостережень референціальних GNSS-станцій, які знаходяться в Карпатському регіоні. Дані GNSS-спостережень дозволяють оцінювати сучасні поверхневі рухи і пов'язані з ними деформації земної кори. Спостереження за рухами (швидкості в пунктах спостережень) дозволяють ідентифікувати (визначити) зони швидкого накопичення напруги, що ймовірно в майбутньому може викликати землетрус. Ця робота присвячена дослідженню деформації земної кори на території Карпатської складчастої системи за даними GNSS-спостережень, що актуально для оцінки природних небезпек регіону.

Методика

Для досліджень використані спостереження з приватної мережі референціальних GNSS-станцій – ZAKPOS за період 2013–2020 р. Мережа ZAKPOS (Transcarpathian Position Determination System) створена у 2008 році ініціативною групою за приватні кошти на території Закарпатської області з обчислювальним центром у м. Мукачево [Офіційний сайт мережі ZAKPOS]. За 2009–2011 роки мережу ZAKPOS розвинуто на території сусідніх областей: Львівської, Волинської, Рівненської, Чернівецької, Івано-Франківської, Тернопільської та Хмельницької. Фактично ZAKPOS набула статусу мережі Західної України. Аналітичний центр ZAKPOS завдяки угоді про співпрацю між мережею і НУ «Львівська політехніка» знаходиться на кафедрі вищої геодезії та астрономії. Сьогодні на території Карпатського регіону діє 28 референціальних GNSS-станцій.

GNSS-дані за 8 років були опрацьовані, а помилки оцінені з використанням програмного забезпечення GAMIT/GLOBK Массачусетського технологічного інституту [Herring, et al., 2016; Krasuski, et al., 2020] за допомогою двоетапного методу. На першому етапі за допо-

могою програми GAMIT визначаються неточності залежно від координат станцій, параметрів орбіт, орієнтації Землі і від атмосферних затримок. На другому етапі глобальний фільтр Кальмана (GLOBK) використовувався для оцінки послідовного набору координат станцій і їх швидкостей змін, комбінуючи щоденні вільні розв'язки, отримані на першому етапі, та їхні коваріації. Система відліку ITRF08 в щоденних комбінованих розв'язках реалізована за допомогою всіх доступних опорних станцій EPN/IGS з України (CNIV, GLSV, MIKL, POLV, SULP, UZHL) та близького зарубіжжя: Австрії (GRAZ), Польщі (BYDG, LAMA, JOZ2, USDL), Молдови (IGEO), Італії (MATE), Росії (MDVJ, ZECK), Німеччини (POTS, WTZR), Латвії (RIGA), Болгарії (SOFI) та Литви (VLNS) [Savchuk & Doskich, 2017].

Для дослідження точності отриманого комбінованого розв'язку виконано його порівняння з розв'язком EPN за спільними станціями та обчислено різниці координат і швидкостей. В табл. 1 наведено статистичний аналіз відмінностей.

Таблиця 1

Результати статистичного аналізу різниць EPN та GAMIT/GLOBK розв'язків

Значення	$X_{(мм)}$	$Y_{(мм)}$	$Z_{(мм)}$
СКП	4,2	3,6	6,9
Значення	V_E (мм/рік)	V_N (мм/рік)	V_H (мм/рік)
СКП	0,3	0,3	1,0

У табл. 2 представлені координати і швидкості горизонтальних зміщень GNSS-станцій Карпатського регіону і суміжних територій. Під горизонтальними зміщеннями ми розуміємо значення швидкості змін координат GNSS-станцій.

Таблиця 2

Координати і швидкості горизонтальних зміщень GNSS-станцій Карпатського регіону і суміжних територій

Станція	Довгота (град.)	Широта (град.)	V_E , мм/рік	V_N , мм/рік	Станція	Довгота (град.)	Широта (град.)	V_E , мм/рік	V_N , мм/рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BAIA	23,5577	47,6518	22,3	13,6	RAHI	24,2012	48,0534	21,5	12,1
BBYS	19,1510	48,7518	21,2	14,9	RDVL	25,2555	50,1301	21,2	13,6
CHTK	25,7927	49,0147	21,3	13,0	RJNT	24,1556	48,9403	21,9	13,6
CRNI	25,9341	48,2764	22,6	13,9	RMNK	27,2509	48,4953	22,9	13,3

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DORO	26,3944	47,9513	22,8	10,4	SANO	22,2008	49,5598	21,7	13,4
EDIN	27,3010	48,1737	22,7	13,0	SATU	22,8693	47,7904	22,2	13,8
FRA2	24,7141	48,9143	21,2	13,6	SHAZ	23,9019	51,5701	21,1	14,0
FRA3	24,7103	48,9180	21,2	13,6	SPAS	25,0198	48,4708	22,1	14,1
FRAN	24,7141	48,9143	21,2	13,6	STRY	23,8719	49,2748	22,0	13,6
GRD2	25,4441	48,6528	21,1	14,1	SULP	24,0145	49,8356	21,7	13,7
GRDN	25,4471	48,6579	21,1	14,1	TER2	25,6102	49,5646	20,8	13,6
HUS1	23,3153	48,1926	21,9	13,6	TERN	25,5558	49,5498	23,8	14,2
HUST	23,2940	48,1762	22,3	13,7	TOML	23,3378	50,3502	20,9	15,2
ISAK	25,2128	48,8268	22,0	15,9	TREB	21,7186	48,6195	22,8	14,4
JARO	22,6678	50,0170	21,0	14,2	USDL	22,5858	49,4329	21,6	14,1
JRSL	22,6678	50,0170	21,0	14,2	UZHL	22,2976	48,6320	22,0	13,9
MIZ1	23,5036	48,5274	22,3	14,5	VAMO	25,5752	47,6516	19,7	14,8
MIZG	23,5013	48,5257	22,3	14,5	VELS	22,1528	48,5127	24,7	14,6
MKRS	22,7093	48,3787	23,3	12,8	WISE	24,4317	47,7082	22,0	13,4
MUK2	22,7224	48,4458	22,5	13,8	VRHV	24,7862	48,1484	22,7	14,5
MUKA	22,7224	48,4458	22,5	13,8	WLDW	23,5576	51,5448	21,3	14,6
NADA	24,5761	48,6378	21,9	13,8	WTZR	12,8789	49,1442	20,2	15,5
RAH1	24,2053	48,0548	21,5	12,1	ZAST	25,8304	48,5273	22,3	13,4

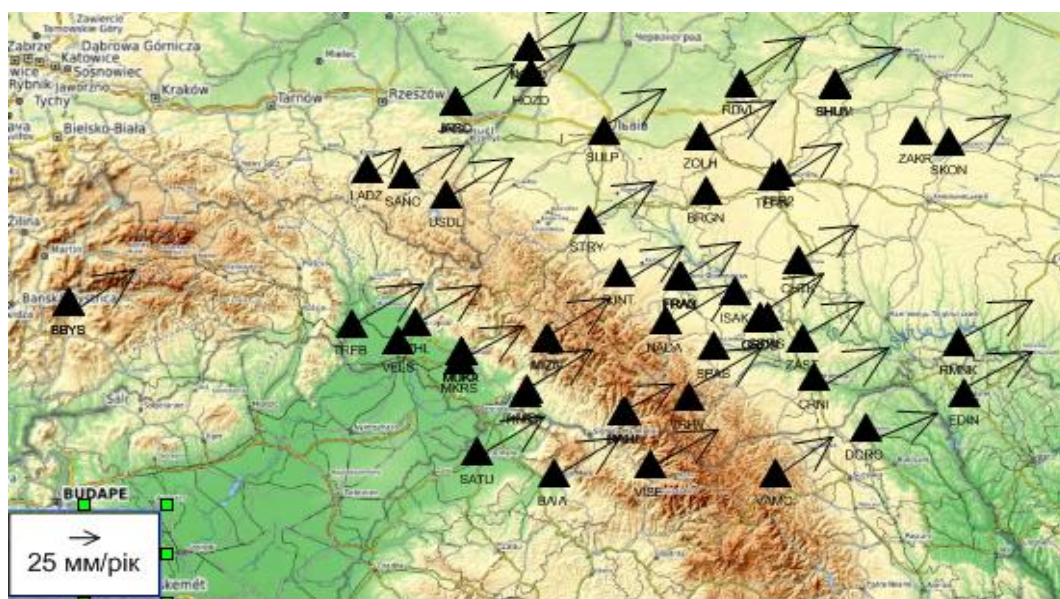


Рис. 1. Картохема швидкостей зміщень GNSS-станцій Карпатського регіону і суміжних територій

На рис. 1 показана картохема горизонтальних швидкостей зміщень GNSS-станцій Карпатського регіону і суміжних територій (внесені в таблицю), яка використана для розрахунку двовимірних деформацій. Стрілки на малюнку показують напрям векторів швидкостей, а значення швидкостей характеризуються довжиною стрілок відповідно до масштабу.

В широкому масштабі поле швидкостей зміщень GNSS-спостережень чітко ілюструє рух поверхні земної кори в північно-східному напрямі.

Результати

Сучасні рухи, що спостерігаються на земній поверхні, відображають тектонічні процеси всередині земної кори. Деформацію земної кори

можна вважати безперервною і розглядати як зміну форми та об'єму тіла, то кожній точці земної кори і її поверхні буде відповідати віднесений до даного моменту часу тензор деформації [Кадиров, Сафаров, 2013]. При аналізі тільки горизонтальних компонент сучасних рухів земної поверхні можливо оцінити плоску деформацію – стан деформації, за якого одна з головних деформацій постійна. У цій роботі для цих цілей використовуються горизонтальні компоненти GNSS-швидкостей.

Під час дослідження для визначення поля швидкості горизонтальної деформації території Карпатського регіону застосовувався метод трикутників, вершинами яких є GNSS-станції з використанням програмного забезпечення «GPS Triangle Strain Calculator» [Офіційний сайт UNAVCO]. Ця програма розроблена в Обсерваторії з вивчення меж тектонічних плит (Plate Boundary Observatory) спільно з Консорціумом університетів (UNAVCO, США). За значеннями швидкостей змін координат на кожній з трьох GNSS-станцій «GPS Triangle Strain Calculator» визначає, які типи перетворень зазнає область між ними. Програма розбиває виміряні GNSS-швидкості на компоненти різних типів трансформацій, обертань, зміщень та деформації. На рис. 2 приведена фінальна конфігурація сформо-

ваних трикутників для визначення поля деформацій.

Для кожного трикутника, представленого на рис. 2, виконані відповідні розрахунки: вектора зміщення, кута повороту і еліпса викривлення (максимальної деформації зміщення та деформації площі). Отримані результати представлено в табл. 3.

Величина максимального відносного зміщення є індикатором геодинамічних змін в земній корі в районі досліджуваного трикутника. Помітно, що з усіх трикутників найбільш активними є трикутники SANO-USDL-LADZ, TREB-USDL-LADZ, JARO-USDL-LADZ і RAH1-MIZG-VRHV. А трикутники TREB-MUKA-SATU, USDL-STRY-MIZG і RJNT-NADA-MIZG – найбільш спокійні.

Щодо величини деформації площі, то позитивне значення говорить про збільшення площі трикутника, негативне – про зменшення. На основі отриманих результатів ми побудували карту деформації площі.

З результатів помітно, що значне збільшення площі демонструють ті самі активні трикутники SANO-USDL-LADZ, TREB-USDL-LADZ, JARO-USDL-LADZ і RAH1-MIZG-VRHV. Зменшення площі демонструють трикутники VAMO-SPAS-VRHV, RAH1-VISE-BAIA і RAH1-HUS1-BAIA.

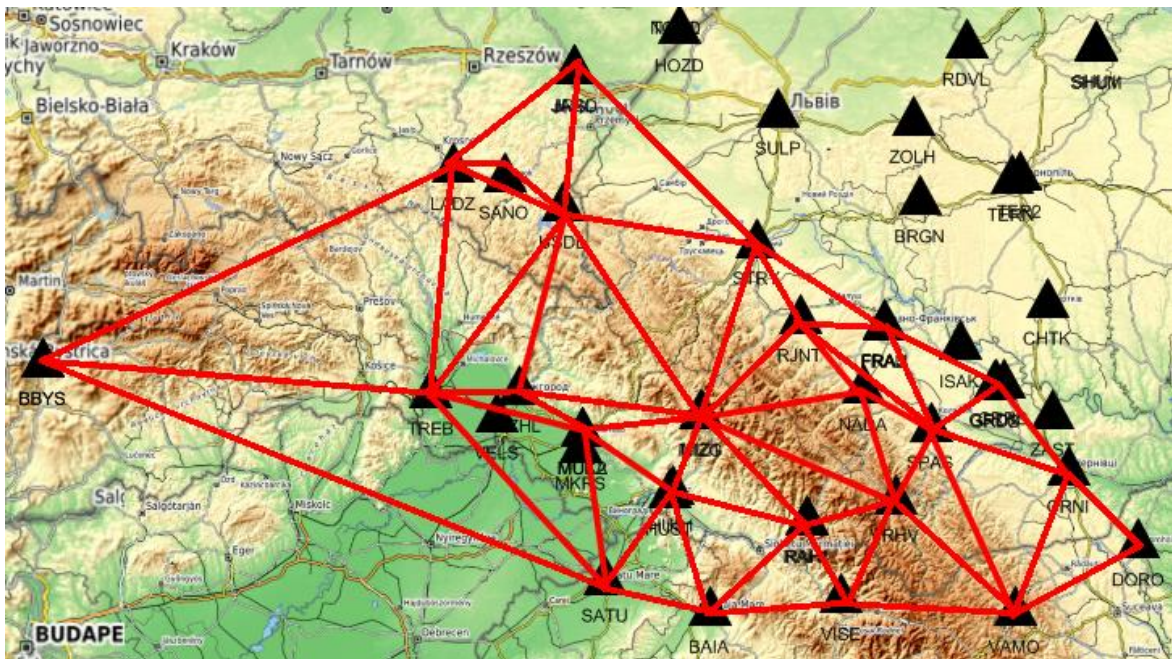


Рис. 2. Конфігурація трикутників

Таблиця 3

Результати розрахунків деформацій земної кори

Трикутник	Вектор зміщення			Кут повороту рад/рік $\times 10^{-9}$ (З – за год с., П – проти год с.)	Максимальна деформація зміщення, 10^{-9}	Деформація площі, 10^{-9}
	Північна компонента мм/рік	Східна компонента мм/рік	Швидкість, мм/рік			
TREB-MUKA-SATU	14,1	22,5	26,5	-5,4688 (П)	4,8287	-6,8045
TREB-BBYS-SATU	14,5	22,1	26,4	-9,6096(П)	15,5641	11,7182
TREB-BBYS-LADZ	14,8	20,0	24,7	30,2976(П)	65,7491	8,3817
TREB-USDL-LADZ	14,5	20,1	24,8	26,7102(П)	116,5837	90,9770
SANO-USDL-LADZ	14,3	19,6	24,3	177,4678(П)	478,2362	298,1121
JARO-USDL-LADZ	14,3	19,5	24,2	-0,9998(З)	106,8448	103,4547
JARO-USDL-STRY	14,0	21,5	25,7	4,8332(П)	9,8690	1,9890
USDL-STRY-MIZG	14,0	21,9	26,0	2,3004(П)	5,3797	2,7882
RJNT-STRY-MIZG	14,0	22,0	26,1	1,1590(П)	5,6502	-5,1529
RJNT-STRY-FRAN	14,0	21,7	25,8	5,2421(П)	21,3002	-18,5412
RJNT-SPAS-FRAN	14,0	21,7	25,8	13,4950(П)	34,3199	-21,1991
NADA-SPAS-VRHV	14,0	22,2	26,2	7,5150(П)	15,3681	-3,2062
NADA-MIZG-VRHV	14,0	22,3	26,3	7,5993(П)	15,3216	-1,9373
RAH1-MIZG-VRHV	13,3	22,1	25,8	-4,3497(З)	80,4622	86,6200
RAH1-UISE-VRHV	13,0	22,0	25,6	24,7891(П)	56,9728	21,5093
VAMO-UISE-VRHV	14,0	21,4	25,6	-2,0248(З)	60,4981	-17,1453
VAMO-SPAS-VRHV	14,3	21,5	25,8	2,4461(З)	43,0634	-50,9733
VAMO-SPAS-CRNI	14,3	21,5	25,8	-19,3383(З)	44,2019	7,0044
VAMO-DORO-CRNI	13,0	21,7	25,3	-60,3795(З)	66,7792	59,4590
RAH1-UISE-BAIA	13,0	21,9	25,5	2,3413(П)	39,0378	-35,2672
RAH1-HUS1-BAIA	13,3	21,9	25,6	-10,6023(З)	42,9437	-19,0063
SATU-HUS1-BAIA	14,0	22,1	26,2	3,8271(П)	7,7503	1,2171
SATU-HUS1-MUKA	14,0	22,2	26,2	-0,8716(З)	12,2737	-12,1493
MIZG-HUS1-MUKA	14,0	22,2	26,2	-6,3963(З)	13,9159	-5,4773
MIZG-UZHL-MUKA	14,0	22,2	26,3	11,2031(П)	22,4264	0,9508
MIZG-UZHL-USDL	14,0	22,0	26,0	2,2685(П)	5,3733	2,8787
MUKA-UZHL-TREB	14,0	22,4	26,4	25,6763(П)	54,2027	-17,3445
NADA-SPAS-RJNT	14,0	22,0	26,0	-6,4572(З)	18,8456	13,7250
GRD2 -SPAS-FRAN	14,0	21,4	25,6	12,4386(П)	29,6883	-16,2024
GRD2 -SPAS-CRNI	14,0	21,9	26,0	20,6811(П)	41,8073	-6,0843
RAH1-HUS1-MIZG	13,3	21,9	25,6	-20,1392(З)	20,7643	5,7560
RJNT-NADA-MIZG	14,0	22,0	26,1	1,5624(П)	5,3549	-4,3487

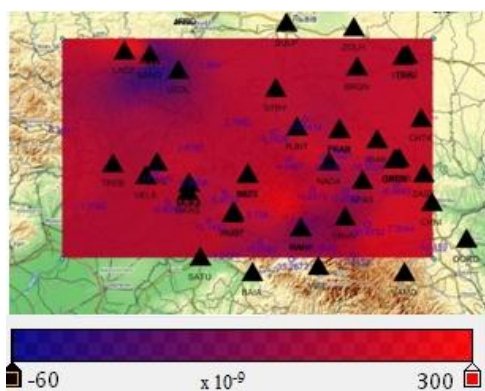


Рис. 3. Карта деформації площі

Стаття підготовлена у пам'ять про видатного українського вченого і патріота Юрія Тарасовича Вербицького, Героя Небесної Сотні і Героя України у рамках щорічного конкурсу наукових робіт «Відзнаки на честь Героя».

Висновки

Розвиток GNSS-технологій зробило можливим проведення дослідження деформацій земної кори Карпатського регіону за даними спостережень на мережі постійно діючих станцій. Для визначення деформацій використано метод

трикутників, вершинами яких є GNSS-станції. Отримані результати показали різну геодинамічну картину, в залежності від розташування трикутників. Зокрема, виділено активні зони розтягу (Рахів–Верховина та Сянок–Устрики-Долішні) та стиснення (Рахів–Хуст–Мукачево). Звісно, для подальшого аналізу та інтерпретації отриманих результатів необхідно долучати геофізичні дані для отримання більш достовірної картини деформаційного поля Карпатського регіону. В майбутньому планується подальший моніторинг та опрацювання спостережень з мережі GNSS-станцій Карпатського регіону, а також, поєднавши отримані супутникові, геофізичні та геологічні спостереження, планується створення регіональної геодинамічної моделі Карпатської складчастої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Вербицький Т., Вербицький Ю., Вербицький С., Ігнатишин В. Прогноз зміни в часі енергії та кількості Закарпатських землетрусів. *Праці наукового товариства ім. Шевченка*. Том VIII. *Геофізика*. Львів-2002. С. 140–144
- Вербицький С. Т., Вербицький Ю. Т. *Сучасні засоби отримання та обробки сейсмологічної інформації. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат*. К.: Наук, думка, 2005. С. 80–86
- Вербицький С. Т., Вербицький Ю. Т. Сучасний стан та перспективи розвитку сейсмологічних досліджень в Карпатському регіоні України. *Геодинаміка*. 2011. № 2(11). С. 35–37.
- Кадиров Ф. А., Сафаров Р. Т. Деформация земной коры Азербайджана и сопредельных территорий по данным GPS измерений. *Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Məruzələri*, LXX cild, № 3. 2013. С. 61–65.
- Назаревич А. В., Любінецький З. І., Микита А. Ю., Каратаєва Л. М., Мельник М. О., Малицький Д. В., Мезенцев В. П., Назаревич Л. С., Коваль Ю. П. Дослідження атмосферного інфразвуку на режимній геофізичній станції “Берегове” у Закарпатті. *Геодинаміка*. 2012. № 2 (13). С. 84–89.
- Назаревич Л. С., Назаревич А. В. Сейсмічність і деякі особливості сеймотектоніки Українських Карпат. *Геодинаміка*. 2012. № 1 (12). С. 145–151
- Офіційний сайт мережі ZAKPOS. URL: <http://zakpos.zakgeo.com.ua/>.
- Офіційний сайт UNAVCO. URL: <https://www.unavco.org/education/education.html>.
- Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.6. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science MIT, USA, 2016, 44 p.
- Krasuski K., Savchuk, S. Determination of the precise coordinates of the GPS reference station in of a gbas system in the air transport. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*, 2020, 22(3). Pp. 11–18.
- Malytskyy D., Verbitsky T., Verbitsky Y. Integrated Geophysical Investigations in the Transcarpathians: Results and Prospects. *XXV General Assembly EGS*, Nice, France, 2000.
- Savchuk S., Daskich S. Monitoring of crustal movements in Ukraine using the network of reference GNSS-stations. *Scientific journal "Geodynamics"*, Volume 2(23) 2017. Pp. 7–13.
- Savchyn I., Vaskovets S. Local geodynamics of the territory of Dniester pumped storage power plant. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2018, 15(1). Pp. 41–46.
- Tretyak K., Romaniuk V. The research of interrelation between seismic activity and modern vertical movements of the European permanent gnss-stations. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2018, 15(2). Pp. 143–164.
- Tretyak K., Vovk A. Differentiation of the rotational movements of the European continent's earth crust. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2016, 13(1). Pp. 5–18.

SOFIIA DOSKICH

Department of Higher geodesy and astronomy, Lviv polytechnic National University, 12, Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: sofiia.v.doskich@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0003-0489-0015>.

DEFORMATIONS OF THE LAND CRUST OF THE CARPATHIAN REGION ACCORDING TO THE DATA OF GNSS OBSERVATION

The emergence of satellite observations was marked by their widespread use to determine the velocities and direction of horizontal motions of lithosphere plates (modern kinematics of lithosphere plates), which allowed to research the deformation processes at the global and regional levels. Today, permanent GNSS stations cover a large part of the land area. Since many of these stations have accumulated a large amount of daily observation over 20 years, it is possible to trace the deformation processes of certain areas. There is the problem of correct identification

of observations of the true parameters of the deformation process. This issue requires the joint work of geophysicists and geodesists. But high-precision time series and values of GNSS station velocities are important and perspective data for the interpretation of geodynamic processes, which are much easier to obtain than geophysical or geological data, do not require special costs and should take into account their active development, the number of such stations is growing rapidly. Today, according to unofficial data, more than 300 reference stations operate in Ukraine. The aim of this work is to detect deformations of the Earth's crust in the Carpathian folded system using GNSS technology. The input data for the research were the observations over eight years (2013–2020) at reference stations in Ukraine (ZAKPOS network). From these observations, the combined solution (coordinates time series and velocities) was calculated using the scientific software GAMIT / GLOBK. According to the obtained data, the horizontal displacements vectors of GNSS stations were also constructed, and the deformations of the Earth's crust were calculated by the method of triangles, the vertices of which are GNSS stations, using the GPS Triangle Strain Calculator software. The calculated values of deformations showed a different geodynamic value, depending on the location of the triangles. In particular, the active zones of stretching (Rakhiv–Verkhovyna and Syanok–Ustryky-Dolishni) and compression (Rakhiv–Khust–Mukachevo) were identified. The research results make it possible to establish the features of the spatial distribution of crustal movement in the Carpathian region and in the future in a joint interpretation with geophysical data to create a regional geodynamic model of the Carpathian folded system.

Key words: GNSS, reference GNSS stations, crustal deformations, GAMIT / GLOBK.

Надійшла 03.04.2021 р.