

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2024.05.023>

УДК 528.2:629.78

О. О. Хода

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ
03143 м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27
oleg@mao.kiev.ua

Визначення швидкостей українських ГНСС-станцій у системі відліку IGb08

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було отримано сукупний розв'язок для GPS-тижнів 935...1933 (7 грудня 1997 р. — 28 січня 2017 р.) шляхом урівнювання за допомогою програми ADDNEQ2 програмного комплексу «Bernese GNSS Software ver. 5.2» 6993 добових файлів нормальних рівнянь, отриманих під час регулярної обробки та другої кампанії репроцесингу архівних спостережень. Перед процедурою урівнювання було проаналізовано часові ряди координат станцій, отримані в результаті вказаних обробок, для виявлення викидів та визначення наборів координат та швидкостей станцій. Для закордонних EPN-станцій було використано файли, підготовлені Європейською перманентною ГНСС-мережею (EPN_outliers.lst та EPN_discontinuities.snх відповідно). Для 233 перманентних ГНСС-станцій було визначено 356 наборів координат, яким відповідають 242 набори швидкостей. За тривалістю спостережень набори координат було розподілено на три групи: 1) менш ніж один рік (94 набори), 2) один — три роки (92 набори), 3) більш ніж три роки (166 наборів). Чотири набори координат було виключено із подальшого аналізу. Система відліку IGb08 задавалася шляхом обмеження No-Net-Translation на координати станцій зі списку IGS Reference Frame з відповідного каталогу. На швидкості цих станцій було накладено жорсткі обмеження (10^{-9} м/рік на кожну складову), що в термінах урівнювання означає фіксацію значень швидкостей. В результаті було отримано високоточні оцінки координат українських та східноєвропейських перманентних ГНСС-станцій та їхніх швидкостей в системі відліку IGb08 на епоху 2005,0. Середні повторюваності

координат станцій дорівнюють 1.69 мм, 1.40 мм та 3.63 мм для північної, східної та висотної складових відповідно.

Ключові слова: ГНСС, система відліку IGb08, перманентні станції, координати станцій, швидкості станцій.

Систему відліку IGb08 — другу реалізацію Міжнародної референсної земної системи відліку ITRF2008 [4], створену Міжнародною ГНСС-службою (IGS) [10], — було офіційно введено 7 жовтня 2012 р. [12]. Вона була чинною до 28 січня 2017 р. (GPS-тижні 1709...1933) разом з оновленою моделлю абсолютних калібрувань комбінацій антена — купол `igs08.atx` [13]. Протягом цього періоду часу всі продукти IGS (точні ефемериди GPS- та ГЛОНАСС-супутників, координати та швидкості перманентних ГНСС-станцій тощо) базувалися на системі відліку IGb08.

У 2013—2015 рр. Міжнародна ГНСС-служба провела другу кампанію репроцесингу архівних спостережень глобальної мережі (герго2) з метою гомогенізувати шляхом внутрішньої узгодженості весь історичний ряд (GPS-тижні 730...1831) комбінованих продуктів IGS — ефемерид ГНСС-супутників, поправок до годинників супутників, параметрів обертання Землі, координат ГНСС-станцій [8]. Європейська перманентна ГНСС-мережа (EPN) [6] здійснила свою другу кампанію репроцесингу (EPN-Repго2) в 2014—2016 рр. [14], в результаті чого були отримані продукти для GPS-тижнів 834...1773.

У Центрі аналізу ГНСС-даних Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО НАН України) було оброблено спостереження GPS- та ГЛОНАСС-супутників для GPS-тижнів 1709...1933 [2] з метою оцінки координат українських перманентних ГНСС-станцій у системі відліку IGb08. У 2015—2016 рр. в ГАО НАН України здійснено переобробку архівних даних спостережень GPS- та ГЛОНАСС-супутників на українських перманентних ГНСС-станціях для періоду спостережень з 7 грудня 1997 р. до 6 жовтня 2012 р. (GPS-тижні 935...1708) [3] завдяки доступності ефемерид ГНСС-супутників у системі відліку IGb08.

Аналіз ГНСС-спостережень було виконано за допомогою програмного комплексу «Bernese GNSS Software ver. 5.2» [5] відповідно до вимог Європейської перманентної ГНСС-мережі, що діяли на той час [9]. Обробка ГНСС-спостережень здійснювалась у повністю автоматичному режимі з використанням модуля комплексу «Bernese Processing Engine» (BPE).

У результаті було отримано узгоджені ряди координат та значень тропосферної рефракції для 202 українських перманентних ГНСС-станцій, 24 закордонних станцій Європейської перманентної ГНСС-мережі та семи станцій мережі MOLDPOS Агентства земельних відносин та кадастру Республіки Молдова. На жаль, після закінчення обробки з'ясувалося, що файли спостережень на станціях мережі MOLDPOS, отримані із потоків у форматі RTCM, було сформовано з

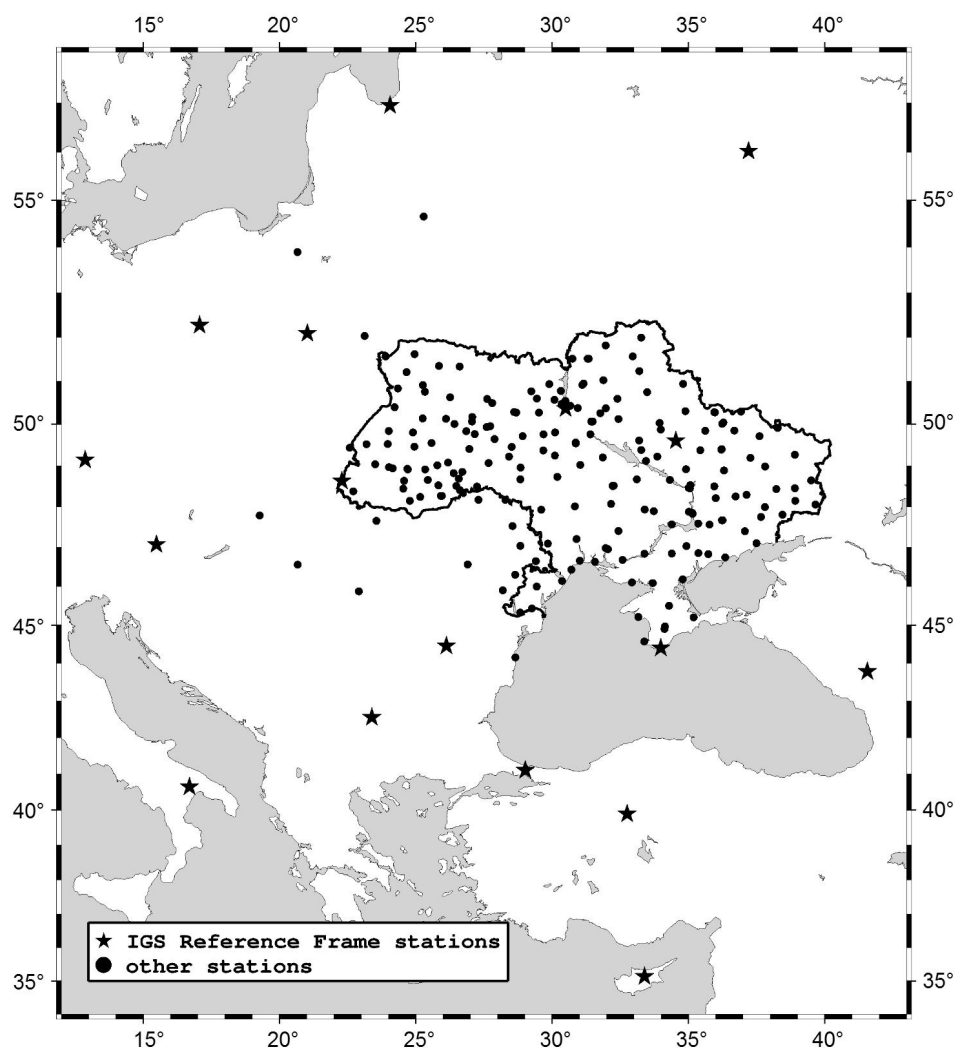


Рис. 1. Розташування перманентних ГНСС-станцій

активною опцією NULLANTENNA, тобто калібрування антен вже були штучно внесені у спостережувані величини. Тому через подвійне врахування калібрувань ГНСС-антен отримані оцінки висот на вказаних семи станціях виявились заниженими на кілька сантиметрів.

Розташування всіх 233 станцій показано на рис. 1, а кількість N станцій для кожного дня спостережень — на рис. 2.

На рис. 3 приведено величини середньої повторюваності значень складових координат ГНСС-станцій для кожного тижня, що характеризують точність отриманих добових та тижневих розв'язків. Видно, що значення північної та східної складових лежать в діапазоні від 0.5 мм до 1.6 мм (середні значення — 1.01 мм та 0.95 мм відповідно), значення висотної складової змінюються від 2.2 мм до 5.4 мм (середнє значення 3.45 мм) з викидами в 5.79 мм та 6.91 мм для GPS-тижнів 943 та 1759 відповідно.

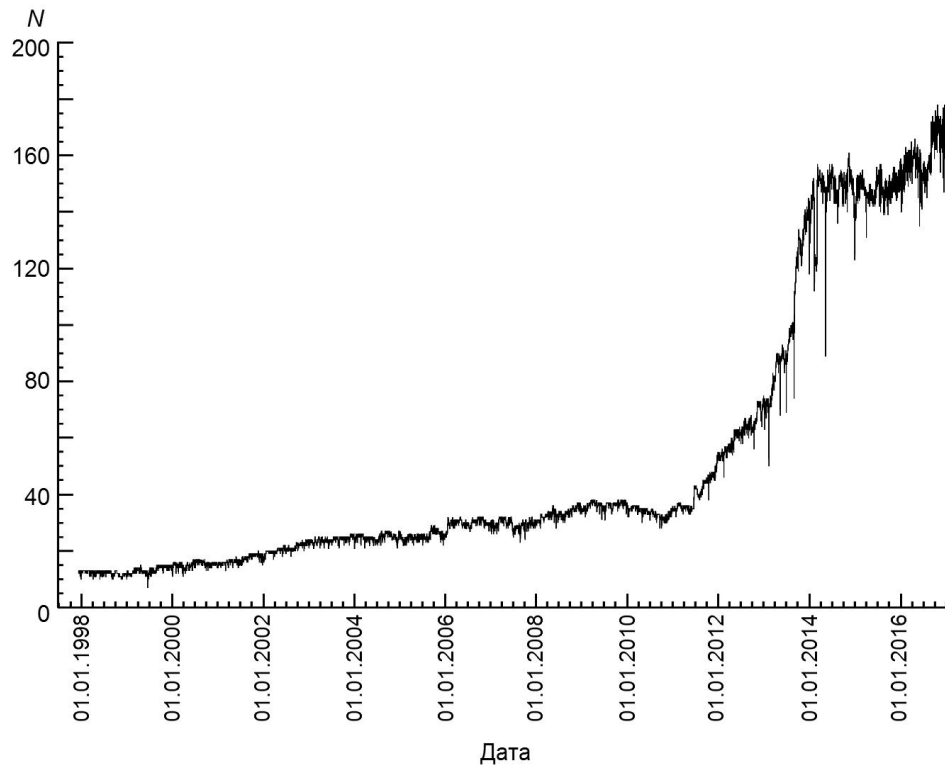


Рис. 2. Кількість N станцій для кожного дня обробки

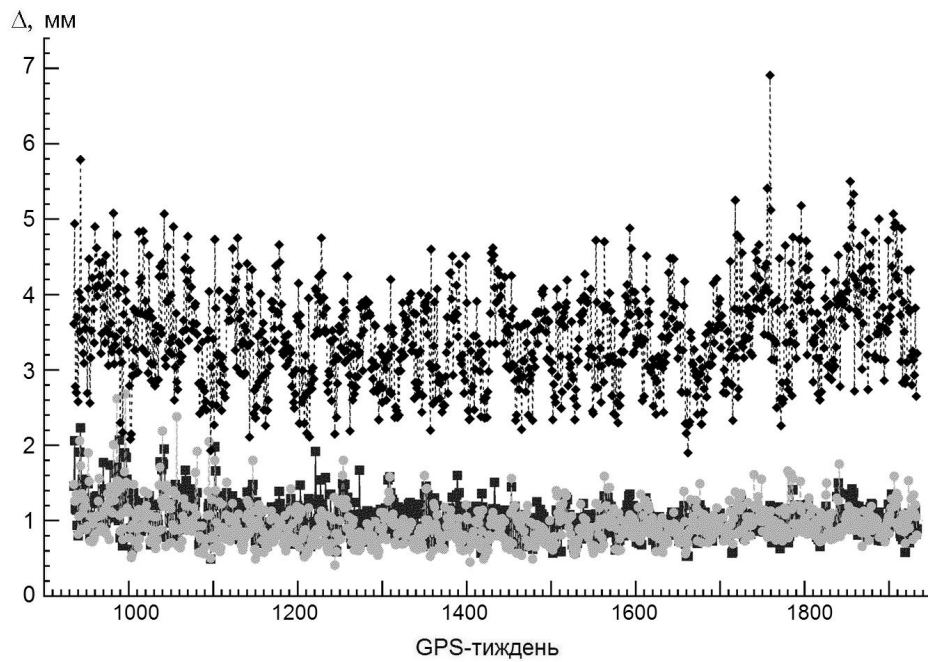


Рис. 3. Зміни середньої повторюваності значень складових координат ГНСС-станцій (квадратики і сірі кружки — північна і східна складові, ромбики — висотна складова)

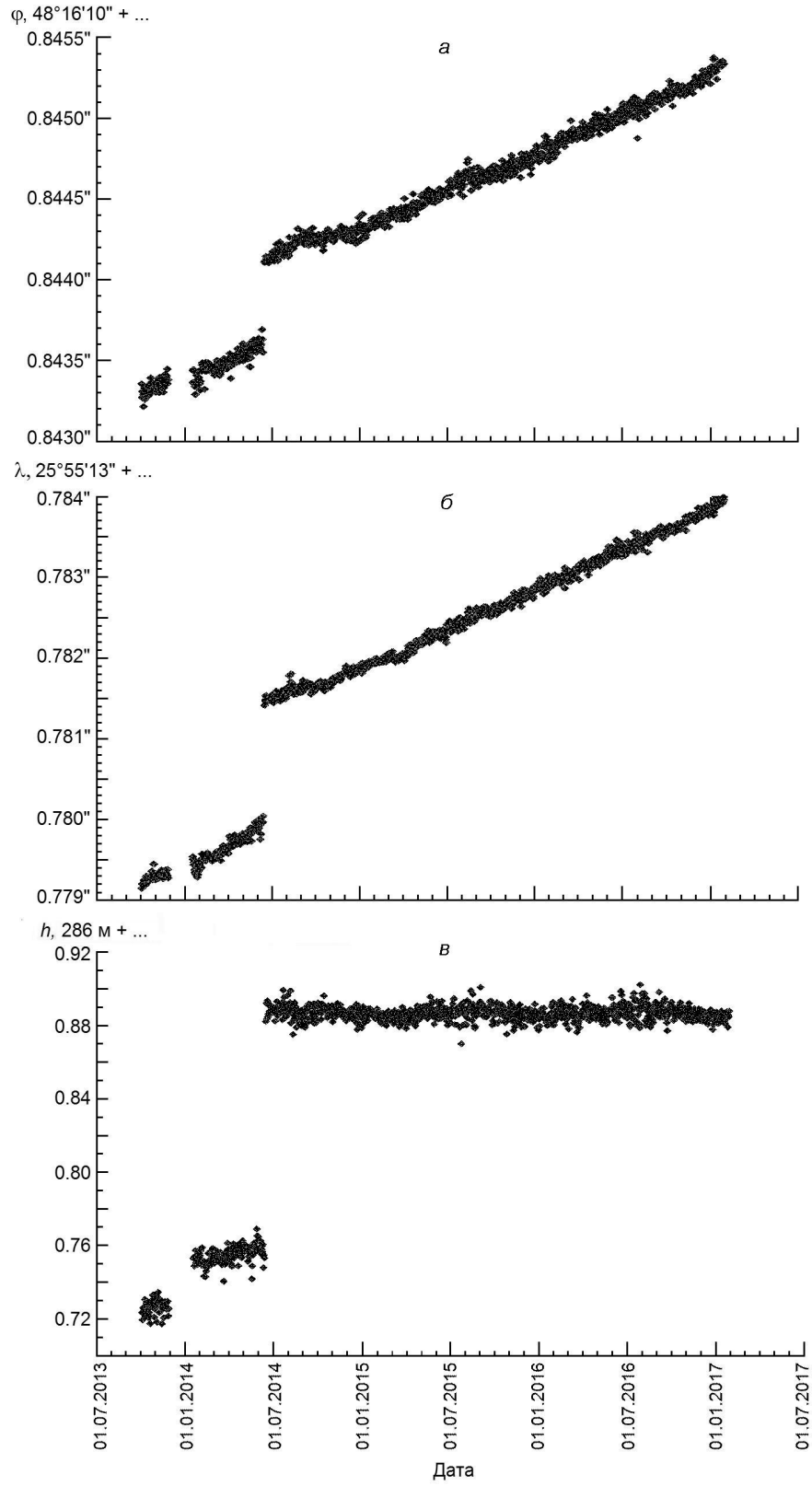


Рис. 4. Часові ряди координат станції CHNT (а — широта, б — довгота, в — висота)

Перед оцінюванням швидкостей перманентних ГНСС-станцій необхідно було виявити викиди та визначити набори координат та швидкостей станцій. Для закордонних EPN-станцій було використано файли даних, підготовлені Європейською перманентною ГНСС-мережею (EPN_outliers.lst та EPN_discontinuities.snх відповідно), для інших станцій було проаналізовано часові ряди координат станцій, отримані в результаті представлених обробок.

Для позначення наборів координат станцій використовувався п'ятий символ комбінації «ідентифікатор DOMES-номер». У випадку, якщо станція не мала DOMES-номера, то для неї використовувався псевдономер, наприклад 00000M000.

На рис. 4 наведено приклад часових рядів координат ГНСС-станцій CHNT (м. Чернівці, DOMES-номер: 15534M001). Видно два стрибки складових координат, другий з яких було спричинено заміною ГНСС-обладнання на станції, та зміну вектора швидкості станції після цієї заміни обладнання. Отже, для станції CHNT було визначено три набори координат (CHNT115534M001, CHNT215534M001 та CHNT315534M001) та два набори швидкостей. Перший набір швидкостей відповідає наборам координат CHNT115534M001 та CHNT215534M001, другий набір швидкостей — набору координат CHNT315534M001. На рис. 5 показано запис для станції CHNT у файлі наборів координат та швидкостей. Номери наборів представлені у третьому стовпчику, тип набору — у сьомому (P — координати, V — швидкість). П'ятий та шостий стовпчики задають період часу для кожного набору. Моменти часу представлені у форматі YY:DDD:sssss, де YY — дві останні цифри року, DDD — день року, sssss — секунда доби. Запис 00:000:00000 означає, що момент часу невизначено.

CHNT	A	1	P	00:000:00000	14:016:00000	P	-	**Unknown**
CHNT	A	2	P	14:016:00000	14:164:00000	P	-	Antenna & Receiver change
CHNT	A	3	P	14:164:00000	00:000:00000	P	-	
CHNT	A	1	P	00:000:00000	14:164:00000	V	-	Antenna & Receiver change
CHNT	A	2	P	14:164:00000	00:000:00000	V	-	

Рис. 5. Набори координат та швидкостей для станції CHNT

Для 233 перманентних ГНСС-станцій було визначено 356 наборів координат, яким відповідають 242 набори швидкостей [11]. За тривалістю спостережень набори координат було розподілено на три групи:

- 1) менше одного року (94 набори),
- 2) один — три роки (92 набори),
- 3) більше трьох років (166 наборів).

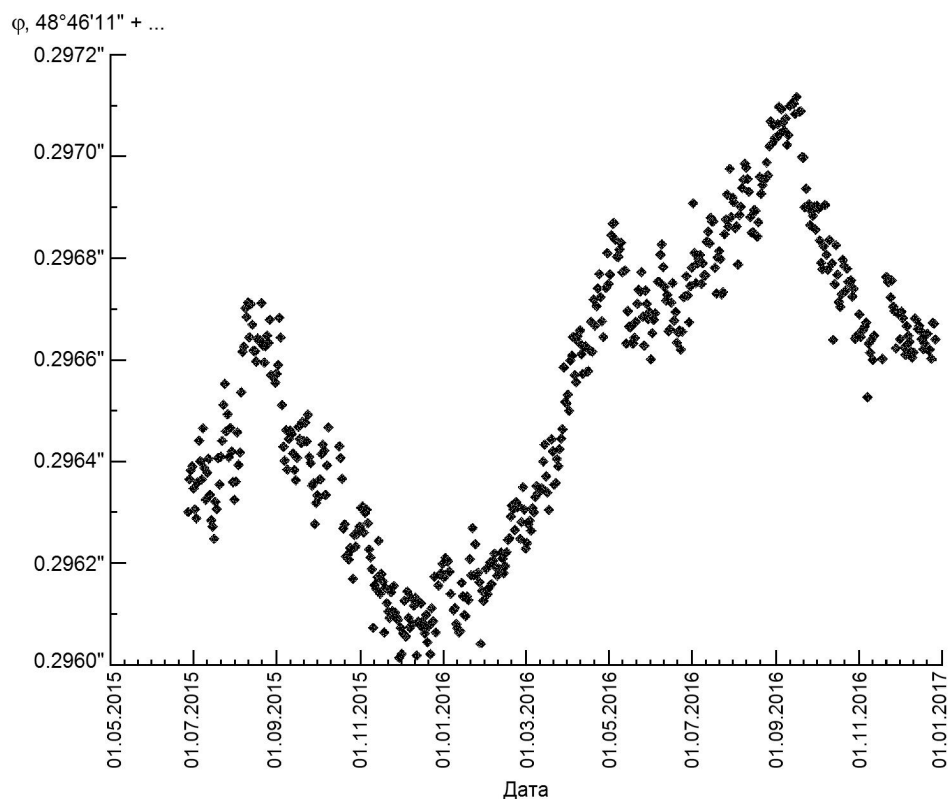


Рис. 6. Часовий ряд широти станції KUCH

Чотири набори координат було виключено із подальшого аналізу:

- KUCH100000M000 (дивні зміни координат, див. рис. 6),
- LAMA212209M001 (згідно із файлом EPN_discontinuities.snх),
- ORH2100000M000 (тільки два дні спостережень),
- SVR0118119M001 (менше трьох тижнів спостережень).

Тривалість спостережень на перманентних ГНСС-станціях показано на рис. 7.

Для отримання сукупного розв'язку за допомогою програми ADDNEQ2 програмного комплексу «Bernese GNSS Software ver. 5.2» було виконано урівнювання 6993 добових файлів нормальних рівнянь для GPS-тижнів 935...1933 (7 грудня 1997 р. — 28 січня 2017 р.), отриманих під час регулярної обробки та другої кампанії репроцесингу архівних спостережень у Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України.

Як апіорні координати було взято координати станцій із каталогу IGB08 або із отриманих розв'язків на відповідний період часу. Апіорні швидкості було взято із каталогу IGB08 або обчислено по моделі NUVEL-1A [7] з використанням апіорних координат.

Система відліку IGB08 (друга IGS-реалізація системи відліку ITRF2008) задавалася шляхом обмеження No-Net-Translation на коор-

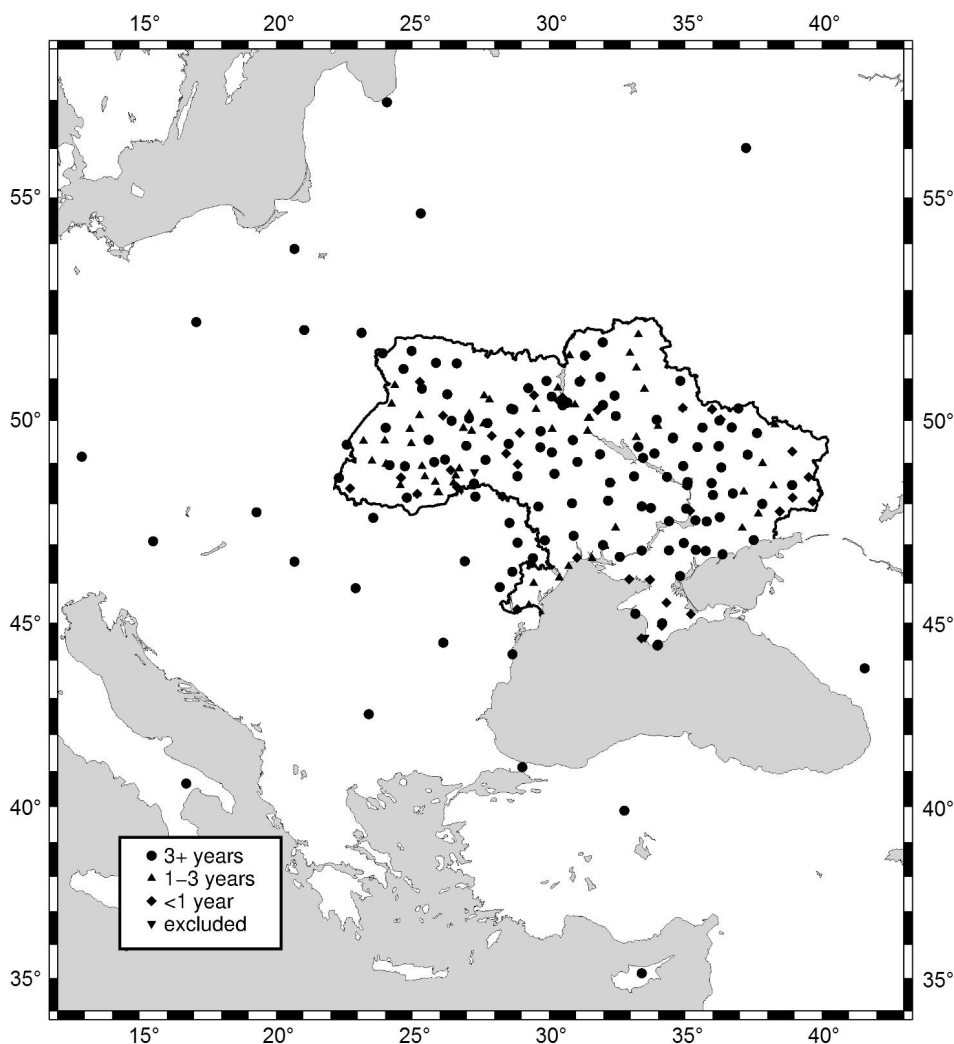


Рис. 7. Тривалість спостережень на ГНСС-станціях

динати станцій зі списку IGS Reference Frame (ANKR, BOR1, BUCU, CRAO, GLSV, GRAZ, ISTA, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, POLV, RIGA, SOFI, UZHL, WTZR та ZECK) з відповідного каталогу. На швидкості цих станцій було накладено жорсткі обмеження (10^{-9} м/рік на кожну складову), що в термінах урівнювання означає фіксацію значень швидкостей.

Без обмежень оцінювались швидкості для тих наборів координат станцій, де тривалість спостережень перевищувала три роки (третья група). На швидкості, що відповідають першій та другій групам наборів координат, було накладено обмеження (відповідно 10^{-6} м/рік та 10^{-3} м/рік на кожну складову).

На координати різних наборів для однієї станції було накладено відносні обмеження (1 мм на кожну складову).

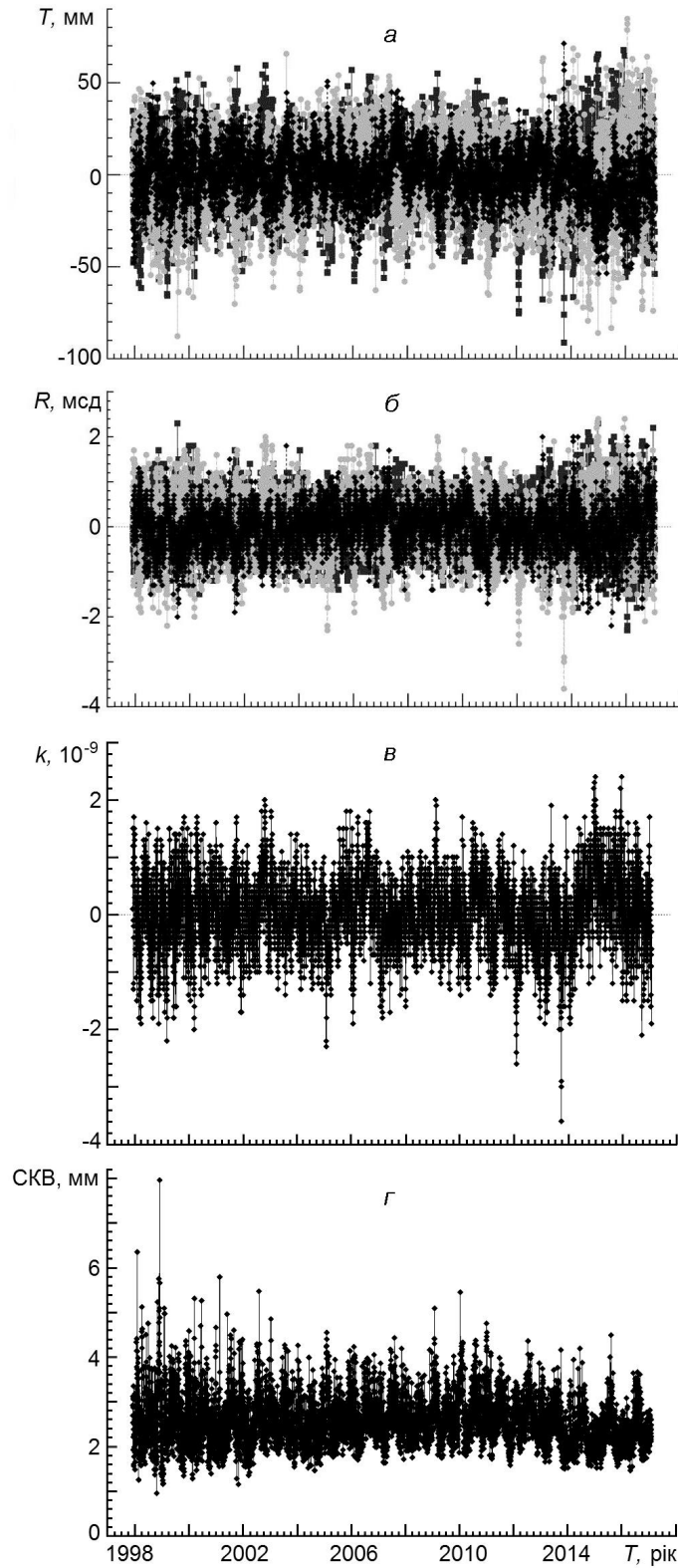


Рис. 8. Параметри перетворення Гельмерта між добовими і сукупним розв'язками: $a, б$ — зсув T та обертання R (квадратики, сірі кружки та ромбики — X -, Y - та Z -складові відповідно), $в$ — масштабний множник k , $г$ — значення СКВ перетворень

У результаті було отримано оцінки координат ГНСС-станцій та їхніх швидкостей в системі відліку IGB08 на епоху 2005.0. Середні повторюваності координат станцій дорівнюють 1.69 мм, 1.40 мм та 3.63 мм для північної, східної та висотної складових відповідно. Параметри перетворення Гельмерта між добовими розв'язками і сукупним розв'язком та значення середніх квадратичних відхилень перетворень показано на рис. 8. Наведені величини показують високу точність обчислених оцінок координат та швидкостей.

Отримані оцінки координат українських ГНСС-станцій для наборів з тривалістю спостережень більш ніж три роки та швидкостей для них наведено у табл. 1. На рис. 9 та 10 показано вертикальні та горизонтальні вектори швидкостей станцій для наборів координат з третьої групи. Видно, що горизонтальні вектори швидкостей станцій

Таблиця 1. Координати та швидкості українських перманентних ГНСС-станцій у системі відліку IGB08 на епоху 2005.0

Станція	Номер DOMES	Набір координат	Період часу	X, м	Y, м	Z, м	V_x , м/рік	V_y , м/рік	V_z , м/рік
ALCI	12371S001	1		3297847.93224	2661607.40741	4750829.82236	-0.02149	0.01430	0.00792
ALX0	15893M001	1		3534712.88125	2305362.01473	4766573.14202	-0.01970	0.01542	0.00769
BALT	15550M001	1		3722655.08835	2115263.72983	4711762.72291	-0.01775	0.01538	0.00792
BAR9	15567M001	1		3707980.31461	1944389.02985	4795838.18226	-0.01813	0.01563	0.00878
BERY	15524M001	1		3649519.80272	2406003.84717	4629187.62317	-0.02057	0.01533	0.00789
BERZ	15511M001	1	до 07.11.2015	3725027.52030	2229185.51720	4657283.66999	-0.01981	0.01462	0.00784
BGS2		1		3559518.42583	2127811.89554	4829905.33079	-0.01901	0.01416	0.00851
BLGR	15540M001	1		3678829.97502	1828336.77223	4862950.61269	-0.01953	0.01434	0.00771
BOBR	15530M001	1		3614411.76868	2272894.45859	4722581.15414	-0.01952	0.01541	0.00861
CHTK	15826M003	2	з 22.03.2013	3773817.78591	1823743.91352	4791846.38181	-0.01722	0.01654	0.00728
CHUG	15913M001	1		3304637.32031	2462566.59142	4851694.29746	-0.01983	0.01291	0.00665
CNIV	15501M001	1	до 12.05.2011 10:00	3397785.22180	2066990.54309	4969811.58631	-0.01928	0.01472	0.00864
CNIV	15501M001	3	з 14.02.2013 11:00	3397785.17794	2066990.51652	4969811.52192	-0.01928	0.01472	0.00864
CRAO	12337M002	1	до 04.03.2009	3783897.10288	2551404.41351	4441264.28383	-0.02013	0.01530	0.00887
CRAO	12337M002	2	з 04.03.2009	3783897.10828	2551404.41982	4441264.28492	-0.02013	0.01530	0.00887
DIZU		1		3463259.37740	2431916.20194	4756188.09750	-0.02086	0.01485	0.00807
DNCK	18114M001	3	21.12.2012 — 04.05.2015 11:00	3378275.82289	2621541.48041	4716841.88094	-0.01955	0.01527	0.00551
DNMU	12369M001	1	до 11.06.2012	3468976.90906	2434669.32954	4750720.12475	-0.02033	0.01473	0.00764
DNMU	12369M001	2	з 11.06.2012	3468976.91027	2434669.32505	4750720.12921	-0.02033	0.01473	0.00764
EVPA	12344M001	1	до 01.02.2011	3767253.49069	2461876.34421	4504591.80364	-0.02050	0.01544	0.00907
EVPA	12344M001	2	з 01.02.2011	3767253.48476	2461876.33639	4504591.77891	-0.02050	0.01544	0.00907
FRAN	15538M004	1		3815148.45686	1755911.60515	4784539.52837	-0.01880	0.01583	0.00841
GLBN	15532M001	1		3478502.62741	2282517.85901	4818298.07469	-0.01981	0.01495	0.00775
GLSV	12356M001	1	до 20.11.2007	3512888.95735	2068979.87499	4888903.21084	-0.01992	0.01421	0.00821
GLSV	12356M001	2	20.11.2007 — 25.08.2013	3512888.95743	2068979.88423	4888903.20021	-0.01992	0.01421	0.00821
GLSV	12356M001	3	25.08.2013	3512888.96366	2068979.88820	4888903.19779	-0.01992	0.01421	0.00821
GNCH	15569M001	1		3632369.86379	2524316.60183	4579680.24910	-0.01955	0.01532	0.00971

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ УКРАЇНСЬКИХ ГНСС-СТАНЦІЙ

Продовження табл. 1

Станція	Номер DOMES	Набір координат	Період часу	X, м	Y, м	Z, м	V_x , м/рік	V_y , м/рік	V_z , м/рік
GPLE	15521M001	1		3469852.25229	2545072.51067	4692202.18708	-0.02111	0.01453	0.00792
GRBN	15592M001	1		3458565.15559	2198412.81531	4871141.38105	-0.01990	0.01482	0.00737
GUSI	15539M001	1		3756644.77913	1847410.43010	4796283.36731	-0.01823	0.01606	0.00877
HMEL	18107M004	1		3706269.15025	1885665.63749	4820450.13484	-0.01804	0.01573	0.00788
IVNK	15925M001	1		3491658.15839	2008111.14479	4928979.36632	-0.01882	0.01483	0.00839
IZUM	15915M001	1		3323171.51846	2529509.77832	4804637.18631	-0.02022	0.01405	0.00746
JTMR	00000M000	1		3583695.35969	1961163.05597	4882052.32338	-0.01815	0.01531	0.00904
KALN	15570M001	1		3650371.66895	1983646.61390	4823693.53340	-0.01797	0.01569	0.00779
KNAR	12314M001	1	до 11.06.2006	3312984.32795	2428203.43059	4863307.82959	-0.01939	0.01517	0.00565
KNAR	12314M001	3	12.11.2008 09:56 — 29.11.2011	3312984.31922	2428203.43019	4863307.83678	-0.01939	0.01517	0.00565
KHRN	15581M001	1		3693781.69324	2361311.26216	4617163.92638	-0.02018	0.01543	0.00836
KIRV	15553M003	2	з 25.12.2011 11:22	3580644.86237	2257443.41299	4755337.21140	-0.01856	0.01591	0.00643
KKSH	15545M001	1		3597284.37945	1674579.15989	4977101.26521	-0.01892	0.01524	0.00839
KMST	12315M001	1		3505801.03429	2066726.64444	4894884.78560	-0.01878	0.01444	0.00879
KOVL	15544M001	1		3638774.27641	1670941.72171	4948311.32745	-0.01853	0.01446	0.00850
KPSK	15806M002	1		3273527.07447	2522518.60993	4841996.94593	-0.02055	0.01424	0.00663
KREM	18105M001	1		3490222.95424	2305260.07030	4799085.18009	-0.02016	0.01492	0.00757
KRGD	18112M002	1		3390041.22970	2412713.39597	4817991.17146	-0.02024	0.01428	0.00714
KRRG	15939M001	1		3574077.00852	2356633.64121	4712152.91579	-0.01992	0.01461	0.00780
KTVL	12337M003	2	з 04.08.2011	3785991.78079	2550749.02086	4439438.26059	-0.01831	0.01826	0.00313
KVDA	15506M001	1		3501746.06501	2076988.03712	4893395.56974	-0.01879	0.01544	0.00882
KZLE		1		3449803.51741	2082376.12341	4927625.92916	-0.01862	0.01459	0.00752
KZLS		1		3465825.34327	2325579.84266	4806876.61922	-0.02017	0.01468	0.00720
LOZV	15916M001	1		3386131.40101	2488414.16804	4782390.75947	-0.01984	0.01394	0.00778
LUBR	15555M001	1		3640093.64334	1914082.58638	4859143.47471	-0.01928	0.01439	0.00868
LUTS	15543M001	1		3654330.34165	1730729.32101	4916423.24109	-0.01851	0.01590	0.00816
MAGD	15512M001	1		3443393.68953	2403366.47208	4784867.39291	-0.02095	0.01478	0.00703
MALN	15507M001	1		3527322.17407	1974526.32725	4917238.74885	-0.01804	0.01537	0.00685
MARP	15556M001	1		3451047.28828	2647880.62074	4649213.48523	-0.01698	0.01299	0.00409
MEZH	15844M001	1		3410018.36689	2544789.91146	4735823.75985	-0.02067	0.01402	0.00837
MIKL	12335M001	1	до 01.11.2007	3698553.98489	2308676.00202	4639769.49518	-0.01855	0.01618	0.00676
MIKL	12335M001	3	з 01.11.2007	3698553.97640	2308675.99758	4639769.50552	-0.01855	0.01618	0.00676
MKVC		1		3653683.92912	1866953.64385	4867288.84279	-0.01837	0.01556	0.00842
MLTP	15528M001	1		3563171.14776	2529754.52584	4630456.40098	-0.02111	0.01456	0.00745
NIZH	15508M001	1	до 13.11.2015	3413641.51899	2123437.23567	4935250.50670	-0.01957	0.01493	0.00781
NKPL	15513M001	3	з 14.02.2013 10:44	3557708.16343	2435365.61048	4684639.15647	-0.02232	0.01069	0.00430
NMSH	15927M001	1		3512102.11057	2035407.00830	4903425.23074	-0.01944	0.01428	0.00618
NSRG	15525M001	1		3606882.38542	2468790.30698	4629543.40125	-0.01986	0.01523	0.00788
NVSL		1		3548737.65082	2553533.68885	4628515.71104	-0.02038	0.01611	0.00898
ORIH		1		3498158.54560	2520902.66752	4684212.11553	-0.01964	0.01537	0.00827
PAVL	15522M001	1		3427391.06088	2485845.12246	4754282.81435	-0.02005	0.01471	0.00792
PERV	15529M001	1		3670457.08025	2191542.87924	4717800.77592	-0.01859	0.01577	0.00831
PLTV		1		3413079.03279	2348808.76458	4833176.10877	-0.02086	0.01387	0.00644
PMSK		1		3355077.92712	2457684.84023	4819782.76356	-0.02118	0.01373	0.00669

Станція	Номер DOMES	Набір координат	Період часу	X, м	Y, м	Z, м	V_x , м/рік	V_y , м/рік	V_z , м/рік
POLV	12336M001	1	до 13.02.2013 11:00	3411557.35052	2348463.98746	4834396.89047	-0.02064	0.01302	0.00807
POLV	12336M001	2	з 13.02.2013 11:00	3411557.34190	2348463.97984	4834396.87761	-0.02064	0.01302	0.00807
PRMR	15527M001	1		3526436.65771	2595733.59031	4622075.14125	-0.02039	0.01494	0.00858
PRVM	15917M001	1		3356010.70785	2457410.53611	4819257.09928	-0.02072	0.01452	0.00749
PRYL	15502M001	1	до 08.11.2012	3425673.19965	2174035.38851	4904999.87670	-0.01974	0.01468	0.00809
PRYL	15502M001	2	з 08.11.2012	3425673.19228	2174035.38590	4904999.87594	-0.01974	0.01468	0.00809
RIVN	15542M001	1		3635935.80429	1794403.27991	4907317.96934	-0.01836	0.01545	0.00896
RJNT		1		3830157.46914	1717771.39621	4786509.27410	-0.01798	0.01609	0.00850
RMNK		1		3764810.62594	1939075.33072	4753782.38080	-0.01802	0.01697	0.00902
SAR3	18108M002	1		3569794.66126	1788894.58249	4957203.55012	-0.01889	0.01415	0.00799
SGOR	15559M001	1		3514431.24782	2494186.40164	4686342.71454	-0.02028	0.01282	0.00867
SHAZ	12370M001	1		3631977.99399	1609614.48731	4973373.06905	-0.01938	0.01474	0.00745
SIMF	15566M002	1		3740929.53434	2536824.27033	4485457.88027	-0.02047	0.01572	0.00889
SKVR	15509M001	1	до 20.12.2016	3586943.22151	2045068.74250	4845326.77297	-0.01817	0.01611	0.00666
SMLA	15503M001	1	до 05.05.2015 08:30	3546267.76289	2204463.90737	4805379.16241	-0.02066	0.01402	0.00938
SNOV	15531M001	1		3351771.73954	2091788.32641	4990471.16950	-0.01894	0.01517	0.00642
SULP	12366M001	1	до 30.03.2013 11:16	3765296.98966	1677559.20377	4851297.40989	-0.01856	0.01551	0.00890
SULP	12366M001	2	з 30.03.2013 11:16	3765296.99270	1677559.20191	4851297.40900	-0.01856	0.01551	0.00890
SUMY	15576M001	1		3307051.46708	2299137.75576	4929176.40607	-0.01891	0.01446	0.00790
TERP	15541M001	1		3739851.31753	1790710.26166	4830609.06804	-0.01787	0.01561	0.00872
TETV		1		3615562.60527	2060489.83083	4817601.75575	-0.01869	0.01574	0.00811
TULC	15520M001	1		3696469.24905	2035712.07648	4766868.34881	-0.01828	0.01590	0.00823
UMAN	15519M001	1	до 09.01.2016	3643068.38715	2120162.20193	4771109.48543	-0.01810	0.01617	0.00664
UZHL	12301M001	1	до 20.12.2010 11:40	3907587.45818	1602428.69205	4763783.76418	-0.01777	0.01636	0.00936
UZHL	12301M001	4	з 20.12.2010 11:40	3907587.46037	1602428.69784	4763783.75285	-0.01777	0.01636	0.00936
VALK	15921M001	1		3350302.09565	2400596.51175	4851514.76589	-0.02004	0.01464	0.00846
VASL		1		3444688.96130	2503180.21079	4732794.59741	-0.02047	0.01446	0.00741
VATU	15518M001	1		3590797.71194	2160778.29538	4792231.42519	-0.01888	0.01538	0.00873
VELM	15514M001	1		3773429.50861	2165026.65404	4648637.38881	-0.02020	0.01579	0.00817
VLCH	15918M001	1		3263627.08758	2453563.96999	4883685.76579	-0.01923	0.01250	0.00715
VRDP	15578M001	2	16.02.2012 — 03.03.2015	3486253.17864	2380263.21944	4765413.79902	-0.01891	0.01565	0.00601
VRHV	15928M001	1		3871109.16166	1787573.26581	4728428.42539	-0.02063	0.01616	0.00779
VRSH	15546M001	1		3592171.17320	1740805.17509	4958188.28153	-0.01857	0.01457	0.00849
VSLE	15818M001	1		3570898.81251	2494321.62924	4643670.21471	-0.02165	0.01405	0.00540
VSOR	15591M001	1		3406077.53113	2292595.25948	4864719.02762	-0.02387	0.01234	0.01079
ZGUR		1		3457870.39656	2158501.67717	4889329.76221	-0.02118	0.01541	0.00743
ZHAS	15899M001	1		3609075.38790	2092316.91702	4808858.77066	-0.01626	0.01399	0.00719
ZHTM	15579M001	1		3585030.88926	1955814.40827	4883186.02898	-0.01810	0.01563	0.00809
ZLST	15517M001	1		3563174.63846	2379140.59768	4709143.52763	-0.02004	0.01540	0.00807
ZPRG		1		3509633.66008	2459644.56621	4707985.22835	-0.02056	0.01461	0.00742

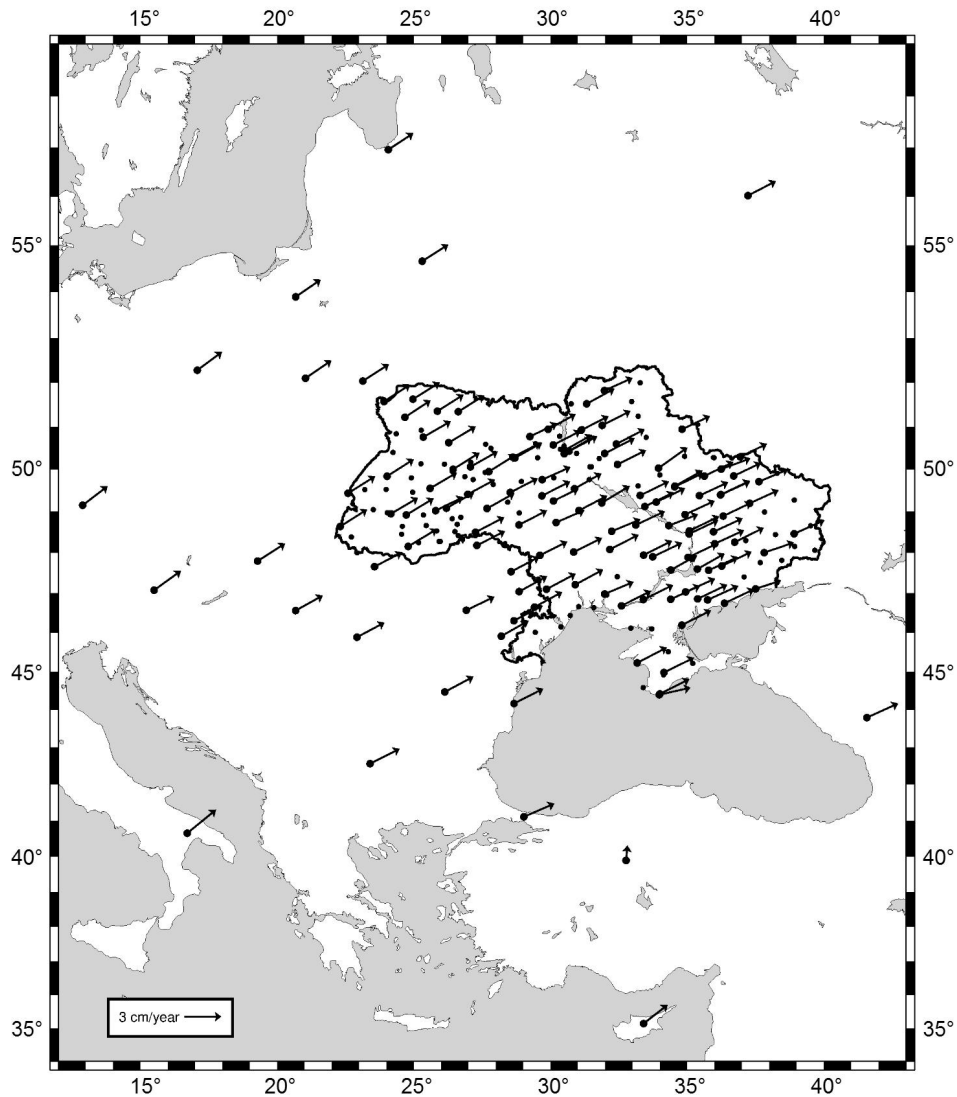


Рис. 9. Горизонтальні вектори швидкостей ГНСС-станцій

відповідають горизонтальному вектору руху Євразійської тектонічної плити. Варто зазначити, що горизонтальний вектор швидкості станції KTVL (південне узбережжя Кримського півострова) значно повернутий за годинниковою стрілкою відносно вектора швидкості розташованої неподалік станції CRAO, і це пояснюється тим, що майданчик, де розміщено ГНСС-станцію KTVL, має локальний рух у південному напрямку зі значною швидкістю [1, рис. 2].

Таким чином, у Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України після урівнювання добових файлів нормальних рівнянь, отриманих під час регулярної обробки та другої кампанії репроцесингу архівних спостережень, було отримано високоточні оцінки координат та швид-

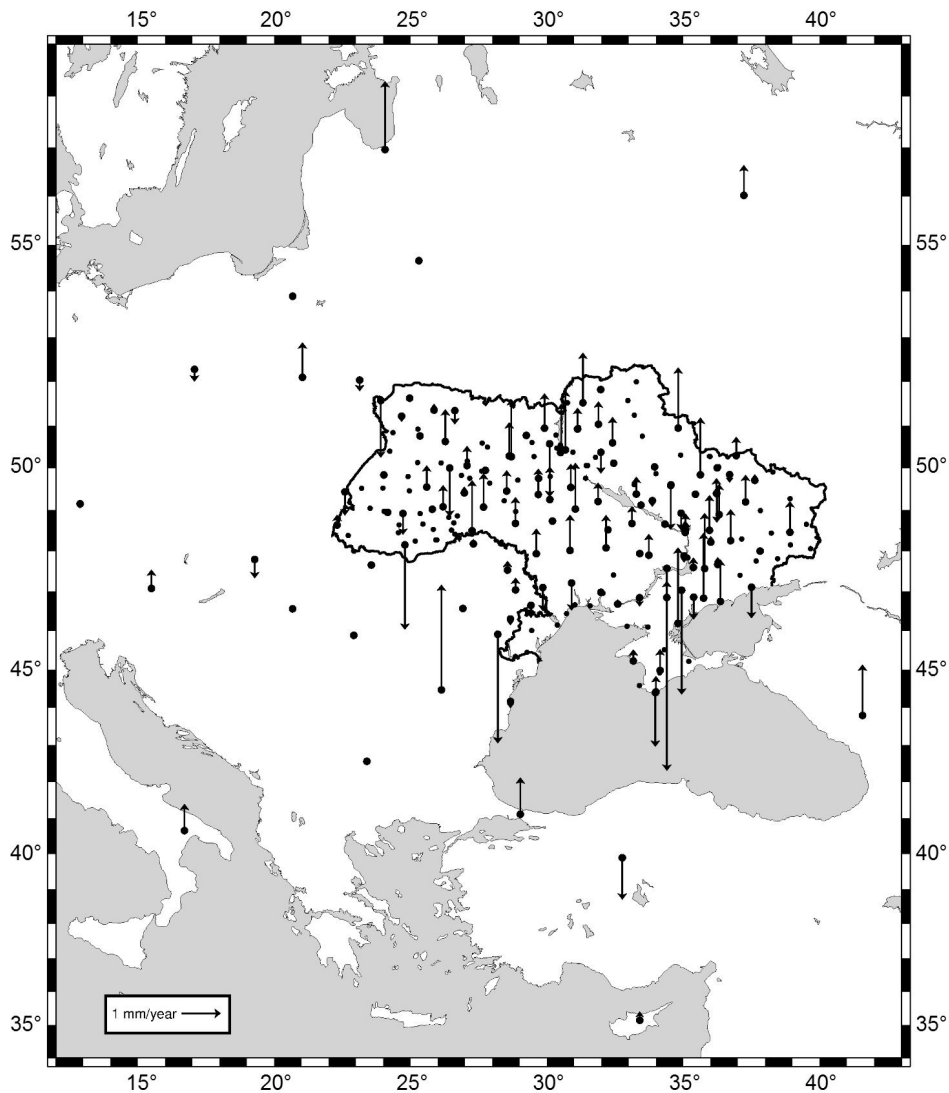


Рис. 10. Вертикальні вектори швидкостей ГНСС-станцій

ностей українських та східноєвропейських перманентних ГНСС-станцій у системі відліку IGB08 на епоху 2005.0.

Автор вдячний д-ру Хоакіну Сурутусі (Dr. Joaquin Zurutuza) із Падуанського університету (Італія) за корисні поради при підготовці обробки для отримання сукупного розв'язку.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота фінансувалась у рамках планового фінансування установ Національної академії наук України.

1. Одинець П. С., Самойленко А. Н., Яцкив Я. С. Исследование деформаций земной поверхности и локальная привязка астрономо-геодезических приборов на Крымском геодинамическом полигоне «Симеиз—Кацивели». *Бюл. Укр. центру визначення параметрів обертання Землі*. 2013. № 8. С. 15–34.
2. Хо́да О. О. Оцінка координат східноєвропейських перманентних ГНСС-станцій в системі координат IGB08 для GPS-тижнів 1709—1933. *Кінематика і фізика небес. тел.* 2019. 35, № 1. С. 70—80. DOI: 10.15407/kfnt2019.01.070.
3. Хо́да О. О. Друга кампанія репроцесингу архівних спостережень в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України. *Кінематика і фізика небес. тел.* 2020. 36, № 5. С. 64—81. DOI: 10.15407/kfnt2020.05.064.
4. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. Geod.* 2011. 85, Issue 8. P. 457—473. DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4.
5. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. (Eds Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P.). Berne: Astronomical Institute, University of Berne. 2015. 894 p. DOI: 10.7892/boris.72297.
6. Bruyninx C., Legrand J., Fabian A., Pottiaux E. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solut.* 2019. 23, Issue 4. Article 106. DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9.
7. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 1994. 21, Issue 20. P. 2191—2194. DOI: 10.1029/94GL02118.
8. Griffiths J. Combined orbits and clocks from IGS second reprocessing. *J. Geod.* 2019. 93, Issue 2. P. 177—195. DOI: 10.1007/s00190-018-1149-8.
9. *Guidelines for the EPN Analysis Centres*. 2022. 10 p. URL: http://epncb.eu/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf (Last accessed 22.04.2024).
10. Johnston G., Riddell A., Hausler G. *The International GNSS Service*. Eds P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., P. 967—982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
11. Khoda O. *EPN Densification Project: Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine*. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium). 2017. URL: http://epncb.eu/_newseventslinks/workshops/EPNLACWS_2017/pdf/05_EPN_densification/06_MAO.pdf (Last accessed 22.04.2024). DOI: 10.13140/RG.2.2.23477.22243.
12. Rebeschung P. *IGB08: an update on IGS08*. IGSMail—6663. 2012. URL: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000497.html> (Last accessed 22.04.2024).
13. Schmid R. *Igs08_1707.atx: Update including JPSREGANT subtype calibrations & R743*. IGSMail—6662. 2012. URL: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000496.html> (Last accessed 22.04.2024).
14. Völksen C. *EPN reprocessing activities: a summary*. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium). 2017. URL: http://epncb.eu/_newseventslinks/workshops/EPNLACWS_2017/pdf/04_EPN_Reprocessing/voelksen_repro-2017.pdf (Last accessed 22.04.2024).

REFERENCES

1. Odynets P., Samoilenko O., Yatskiv Ya. (2013) Study of the Earth surface deformations and local ties of astronomy-geodetic instruments at the Crimean geodynamics test area Simeiz — Kaczively. *Bull. Ukrainian Centre of Determination of the Earth Orientation Parameters*. 8. 15—34. (In Russian)

2. Khoda O. (2019). Estimation of coordinates of the Eastern European permanent GNSS stations in the IGB08 reference frame for GPS weeks 1709—1933. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 35 (1). 46—53. DOI: 10.3103/S0884591319010045.
3. Khoda O. (2020). The second reprocessing campaign of historical observations in the GNSS data analysis centre of MAO NAS of Ukraine. *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. 36 (5). 243—252. DOI: 10.3103/S0884591320050050.
4. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. (2011) ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. Geod.* 85 (8). 457—473. DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4.
5. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. (2015) (Eds Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P.). Berne: Astronomical Institute, University of Berne. 894 p. DOI: 10.7892/boris.72297.
6. Bruyninx C., Legrand J., Fabian A., Pottiaux E. (2019) GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network, *GPS Solut.* 23 (4). Article 106. DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9.
7. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 21 (20). 2191—2194. DOI: 10.1029/94GL02118.
8. Griffiths J. (2019) Combined orbits and clocks from IGS second reprocessing. *J. Geod.* 93 (2). 177—195. DOI: 10.1007/s00190-018-1149-8.
9. *Guidelines for the EPN Analysis Centres*. (2022) 10 p. URL: http://epncb.eu/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf (Last accessed 22.04.2024).
10. Johnston G., Riddell A., Hausler G. (2017) *The International GNSS Service*. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (Eds), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., P. 967—982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
11. Khoda O. (2017) *EPN Densification Project: Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine*. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium). URL: http://epncb.eu/_newseventslinks/workshops/EPNLACWS_2017/pdf/05_EPN_densification/06_MAO.pdf (Last accessed 22.04.2024). DOI: 10.13140/RG.2.2.23477.22243.
12. Rebischung P. (2012) *IGb08: an update on IGS08. IGSMAIL—6663*. URL: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000497.html> (Last accessed 22.04.2024).
13. Schmid R. (2012) *Igs08_1707.atx: Update including JPSREGANT subtype calibrations & R743. IGSMAIL—6662*. URL: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000496.html> (Last accessed 22.04.2024).
14. Völksen C. (2017) *EPN reprocessing activities: a summary*. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium). URL: http://epncb.eu/_newseventslinks/workshops/EPNLACWS_2017/pdf/04_EPN_Reprocessing/voelksen_repro-2017.pdf (Last accessed 22.04.2024).

O. Khoda

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, Ukraine

ESTIMATION OF VELOCITIES OF UKRAINIAN GNSS STATIONS IN THE IGB08 REFERENCE FRAME

The cumulative solution for GPS weeks 935...1933 (December 7, 1997 — January 28, 2017) was received in the GNSS Data Analysis Centre of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine after adjustment of 6993 daily normal equation files received

as results of the regular processing and the second reprocessing campaign of historical observations. The ADDNEQ2 program of the Bernese GNSS Software ver. 5.2 was used. Before the adjustment the times series of station coordinates received from the mentioned processing were analyzed to find outliers and determine sets of coordinates and velocities. For foreign EPN stations the files prepared by the EUREF Permanent GNSS Network were used (EPN_outliers.lst and EPN_discontinuities.snx respectively). For 233 permanent GNSS stations the 356 sets of coordinates and 256 sets of velocities that correspond them were established. According to the duration of observations the coordinate sets were divided into three groups: 1) less than one year (94 sets), 2) one to three years (92 sets), 3) more than three years (166 sets). Four coordinate sets were excluded from the further analysis. The IGB08 reference frame was realized by applying No-Net-Translation conditions on the coordinates of the IGS Reference Frame stations. The velocities of these stations were heavily constrained (10^{-9} m/year for each components) that in term of adjustment means a fixing of velocities values. As result, the coordinates and velocities of the Ukrainian and the Eastern European stations in the IGB08 reference frame at epoch 2005.0 were estimated with high precision. The mean repeatabilities for components of station coordinates are 1.69 mm, 1.40 mm, and 3.63 mm for the north, east, and height components respectively.

Keywords: GNSS, IGB08 reference frame, permanent stations, station coordinates, station velocities.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2024

Після доопрацювання 22.04.2024

Прийнята до друку 20.06.2024