

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2024.06.019>

УДК 550.3

### **Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022  
E-mails: Leonid.F.Chernogor@gmail.com  
Marya160588@gmail.com

## **Помірні магнітні бурі 28 квітня — 2 травня 2023 р.**

*Магнітні, іоносферні, атмосферні та електричні бурі є складовими геокосмічної бурі, що виникає внаслідок бурі на Сонці. У літературі головна увага приділяється аналізу сильних і екстремальних геокосмічних бур. Саме такі бурі найбільше впливають на систему Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера і є найбільш небезпечними для технологічних систем космічного та наземного базування. Такі бурі суттєво впливають на самопочуття та здоров'я людини. Слабкі та помірні бурі вивчено набагато гірше, ніж сильні та екстремальні. Є вагомі підстави вважати, що й такі бурі можуть завдавати певного впливу на системи та людей. Важливо, що частота появи помірних бур набагато більша за частоту сильних бур. Актуальність роботи зумовлена тим, що дослідженням магнітних збурень, що виникають під час помірних геокосмічних бур, приділяється незаслужено мало уваги. Метою цієї роботи є аналіз у глобальних масштабах часових варіацій компонентів геомагнітного поля під час помірних магнітних бур 28/29 квітня та 1/2 травня 2023 р. У роботі з використанням даних світової мережі станцій INTERMAGNET у глобальних масштабах проаналізовано широтну залежність часових варіацій компонентів геомагнітного поля під час двох помірних магнітних бур у квітні — травні 2023 р. та у контрольні дні. Оцінено межі флуктуацій рівня геомагнітного поля у спокійних умовах і протягом помірних бур. Розмах варіації рівня геомагнітного поля у спокійних умовах зменшувався від 200...260 до 30...50 нТл при зменшенні географічної широти. Під час бур ці межі збільшувалися у 1.3...2.1 раза. Варіації рівня компонентів на станціях, рівновіддалених від екватора, були близькими. Це справедливо як для західної, так і східної півкулі. Та-*

кож близькими були флуктуації рівня геомагнітного поля на станціях, що функціонують приблизно на одній і тій же широті, але в різних півкулях.

**Ключові слова:** помірні магнітні бурі, широтна залежність, магнітні збурення, флуктуації рівня, розмах варіації.

## ВСТУП

Магнітним бурям, як складовим геокосмічних бур, присвячено велику кількість наукових статей та монографій [1—6, 8—10, 12, 15—18, 20—22, 29—31, 33—36, 38, 39, 41, 42, 44—47]. Ефекти тільки однієї, найсильнішої магнітної бурі у 24-му циклі сонячної активності, описано в десятках робіт (див., наприклад, [14, 19, 32, 43, 48]). Зазвичай основна увага приділяється найсильнішим бурям [11, 23—28, 37], бо вони найбільше впливають на систему Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, на технологічні системи та стан здоров'я населення [7, 8, 10, 13]. Значно гірше вивчено вплив слабких і помірних бур. Є підстави вважати, що слабкі магнітні бурі ( $K_p = 3, 3+, 4-$ ) можуть завдавати певного впливу. Потрібно мати на увазі, що частота появи таких бур набагато більша, ніж сильних. Слабких та помірних ( $K_p = 4, 4+, 5-$ ) бур може відбуватися десятки-сотні за рік. Крім того, ефекти, що супроводжують слабкі та помірні бурі, можуть бути своєрідною межею, точкою відліку для ефектів сильніших бур.

У цьому полягає актуальність досліджень слабких і помірних бур.

Метою цієї роботи є аналіз у глобальних масштабах часових варіацій геомагнітного поля під час помірних магнітних бур 28—29 квітня та 1—2 травня 2023 року.

## МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для аналізу збурень геомагнітного поля наприкінці квітня — початку травня 2023 р. використано результати вимірювань на мережі INTERMAGNET [[https://intermagnet.org/new\\_data\\_download.html](https://intermagnet.org/new_data_download.html)]. Розрізнення за часом складає 1 хв, а за амплітудою — 0.1 нТл. Аналізу підлягали часові варіації X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля, що були зареєстровані на 14 магнітних станціях як західної, так і східної півкуль (табл. 1). Станції у кожній півкулі зосереджувалися поблизу фіксованого меридіану. Це дозволило прослідкувати широтну залежність магнітних збурень. Оскільки метою роботи було дослідити часові варіації компонентів геомагнітного поля, спочатку обчислювався тренд, а потім він віднімався від вихідного сигналу.

Для аналізу стану космічної погоди було використано часові залежності параметрів сонячного вітру (концентрації частинок  $n_{sw}$ , температури  $T_{sw}$ , радіальної швидкості  $V_{sw}$  та динамічного тиску  $p_{sw}$ ) ком-

**Таблиця 1.** Загальні відомості про станції Західної і Східної півкуля, моменти сходу та заходу Сонця на висотах 0 і 200 км

Станція	Місцезнаходження	Географічні координати, широта/довгота	Геомагнітні координати, широта/довгота	Схід, висота 0 км/ висота 200 км	Захід, висота 0 км/ висота 200 км
ЗАХІДНА ПІВКУЛЯ					
GDH	Qeqertarsuaq (Godhavn) Greenland	69.2520°N / 53.5330°W	+77.52 / +32.69	22:58° / —	17:46° / —
IQA	Iqaluit Canada	63.7530°N / 68.5180°W	+72.83 / +6.24	22:53° / —	15:51° / —
OTT	Ottawa Canada	45.4030°N / 75.5520°W	+54.46 / —3.51	23:44 / 22:05	14:04 / 15:43
FRD	Fredericksburg United States of America	38.2100°N / 77.3670°W	+47.25 / —5.47	23:53 / 22:29	13:42 / 15:05
PIL	Pilar Argentina	31.6670°S / 63.8810°W	—22.33 / +8.08	00:55 / 23:41	14:23 / 15:38
AIA	Akademik Vernadsky base Faraday Islands	65.2450°S / 64.2580°W	—55.91 / +6.30	23:01 / —	16:18 / —
СХІДНА ПІВКУЛЯ					
PET	Paratunka (Petropavlovsk)	52.9710°N / 158.2480°E	+46.44° / —137.07°	17:50 / 15:37	08:58 / 11:10
KHB	Khabarovsk	47.6100°N / 134.6900°E	+39.05° / —156.42	19:41 / 17:54	10:13 / 11:59
CYG	Cheongyang Korea	36.3700°N / 126.8540°E	+27.41 / —162.32	20:37 / 19:16	10:19 / 11:40
KDU	Kakadu Australia	12.6900°S / 132.4700°E	—20.96° / —153.66	20:49 / 19:46	09:24 / 10:27
CTA	Charters Towers Australia	20.0900°S / 146.2640°E	—27.05 / —138.48	19:45 / 18:40	08:38 / 9:44
CNB	Canberra Australia	35.3200°S / 149.3600°E	—41.75 / —132.81	19:10 / 17:51	08:18 / 10:08
MCQ	Macquarie Island Australia	54.5000°S / 158.9500°E	—59.32 / —116.38	17:41 / 15:19	08:57 / 11:19
CSY	Casey Station Antarctica	66.2830°S / 110.5330°E	—75.38° / —174.88°	19:46 / —	13:22 / —

понентів міжпланетного магнітного поля  $B_z$  і  $B_y$ , енергетичної функції Акасофу  $A$ , індексів  $K_p$  та  $D_{st}$  (рис. 1). Вихідні дані представлено на сайтах [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>].

Концентрація частинок у сонячному вітрі з 28 квітня до 12:00 UT (тут і далі UT — всесвітній час) 3 травня 2023 р. перебувала на рівні фонового значення  $n_{sw} = (2...3) 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Швидкість частинок у сонячному вітрі збільшилась від фонового значення  $V_{sw} = 300...350 \text{ км/с}$  до 700 км/с, після чого, флюктуючи, поступово зменшувалася до фоново-

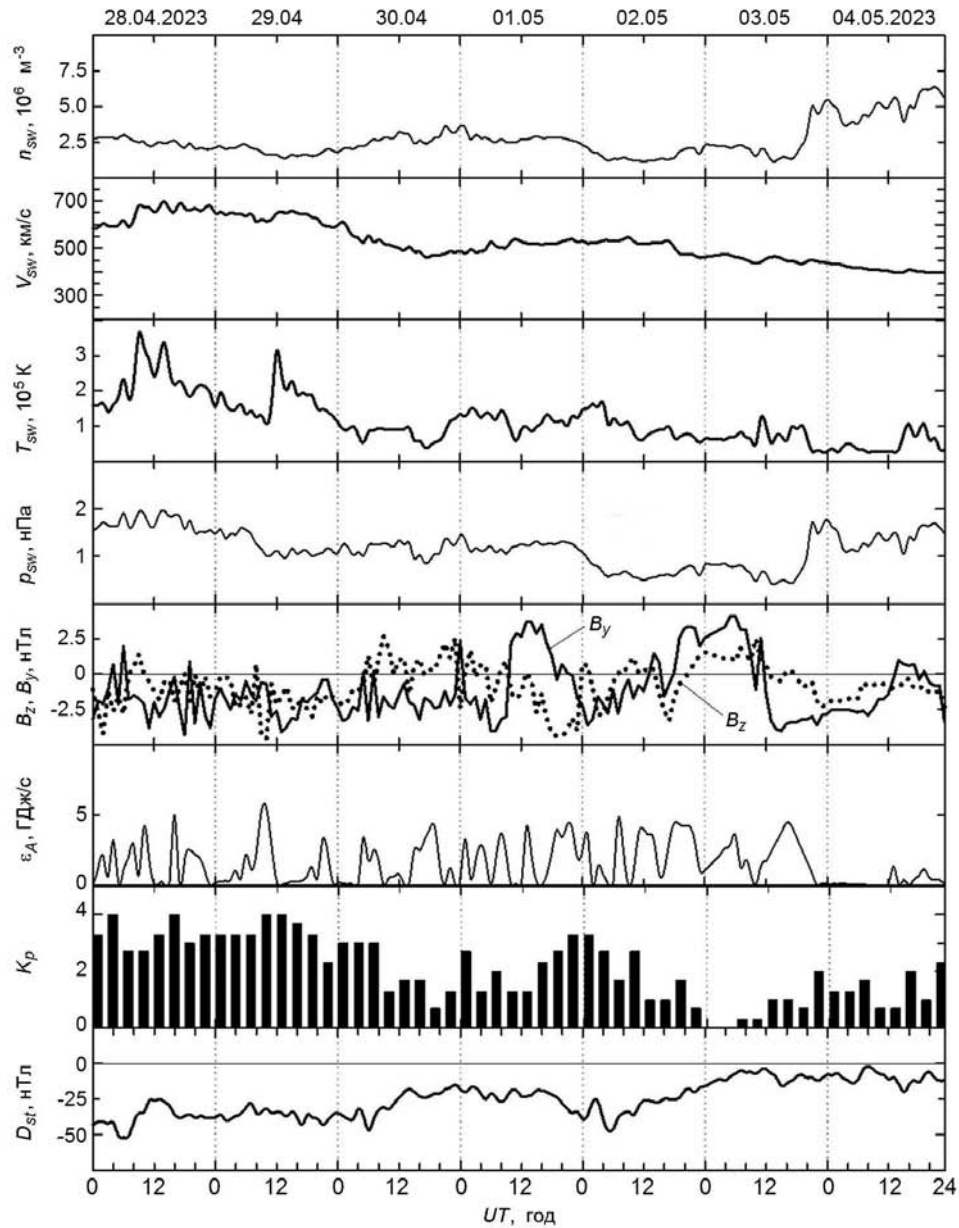


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: вимірюваної концентрації частинок  $n_{sw}$ , температури  $T_{sw}$ , радіальної швидкості  $V_{sw}$  та розрахованого динамічного тиску  $p_{sw}$ , вимірювані компоненти  $B_z$  і  $B_y$  міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії  $\epsilon_A$ , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу;  $K_p$ -індексу та  $D_{st}$ -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 28 квітня—04 травня 2023 р.

го значення. Температура частинок у сонячному вітрі збільшилась від фонового значення  $T_{sw} = (0.5 \dots 1) 10^5$  К до  $(2 \dots 3.6) 10^5$  К. Динамічний тиск частинок у сонячному вітрі 28—29 квітня та 1 і 4 травня збільшувався від фонового значення  $p_{sw} = 0.5$  нПа до  $1 \dots 2$  нПа.

Мали місце знакозмінні варіації компонентів міжпланетного магнітного поля. Так,  $B_y$ -компонент змінювався від  $-4.3$  до  $4.1$  нТл,  $B_z$ -компонент — від  $-4.6$  до  $2.7$  нТл.

Функція Акасофу, що описує приплив енергії в одиницю часу в магнітосферу, епізодично збільшувалась від фонового значення  $A \sim 1$  ГДж/с до  $4 \dots 5.5$  ГДж/с.

28—29 квітня та 1—2 травня 2023 р. індекс  $K_p$  збільшувався до  $3.3 \dots 4$ . Водночас  $D_{st}$ -індекс зменшувався до  $-50 \dots -52$  нТл. Саме в ці дні виникали помірні геокосмічні бурі. Як контрольні дні розглядалися 3 та 4 травня 2023 р.

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Спочатку розглянемо магнітні станції у Західній півкулі.

Станція GDN. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів цієї високоширотної станції показано на рис. 2. Найбільший розмах, тобто різниця між максимальним і мінімальним значеннями варіацій, для X- і Y-компонентів мав місце 29 квітня 2023 р., а для Z-компонента — 28 квітня 2023 р. (рис. 2). Ці розмахи становили відповідно  $550$ ,  $500$  і  $780$  нТл (табл. 2).

Станція IQA. Для цієї станції найбільший розмах усіх компонентів спостерігався 29 квітня 2023р. (рис. 3). Його значення сягали  $1000$ ,  $750$  і  $750$  нТл для X-, Y- і Z-компонентів відповідно (див. табл. 2).

Станція OTT. Часові варіації геомагнітних компонентів показано на рис. 4. Найбільший розмах не перевищував  $100 \dots 110$  нТл (див. табл. 2).

Станція FRD. Найбільші варіації рівня усіх компонентів дорівнювали  $50 \dots 60$  нТл. (рис. 5). Розмах сягав  $70 \dots 90$  нТл (див. табл. 2).

Станція PIL. На відміну від інших станцій, ця станція лежить у південній півкулі. Найбільшими варіаціями всіх компонентів були 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 6). Вони сягали  $60 \dots 70$  нТл (див. табл. 2).

Станція AIA. Ця станція лежить у південних високих широтах. 28 та 29 квітня 2023 р. всі три компоненти варіювали у межах до  $100 \dots 120$  нТл (рис. 7). 1 та 2 травня 2023 р. ці варіації були у  $2 \dots 3$  рази меншими. Ще меншими вони були у контрольні дні 3 та 4 травня 2023 р. (див. табл. 2).

Далі розглянемо станції у Східній півкулі.

Станція PET. Часові варіації рівня всіх компонентів показано на рис. 8. Найбільший розмах (до  $85$  та  $80$  нТл) мав місце відповідно 28 та 29 квітня 2023 р. (табл. 2).

Станція KHB. З рис. 9 можна бачити, що найбільші варіації сягали  $90$  та  $77$  нТл відповідно 28 та 29 квітня 2023 р. Самі варіації були подібними до варіацій на станції PET.

Станція CYG. Найсильніші варіації X- і Y-компонентів спостерігалися також 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 10). Розмах сягав  $70 \dots$

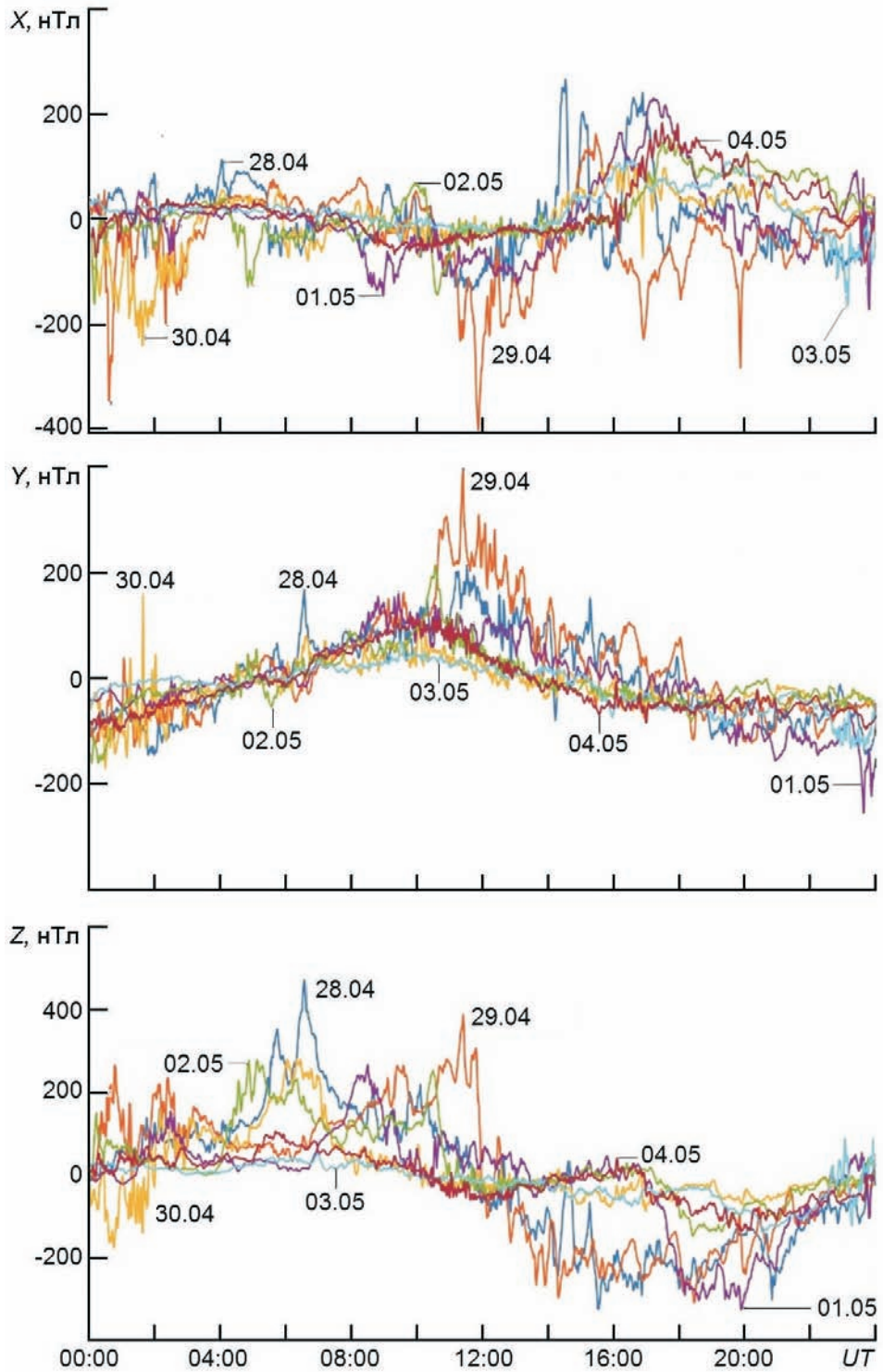


Рис. 2. Часові варіації рівня X-, Y- і Z-компонентів для станції GDH. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

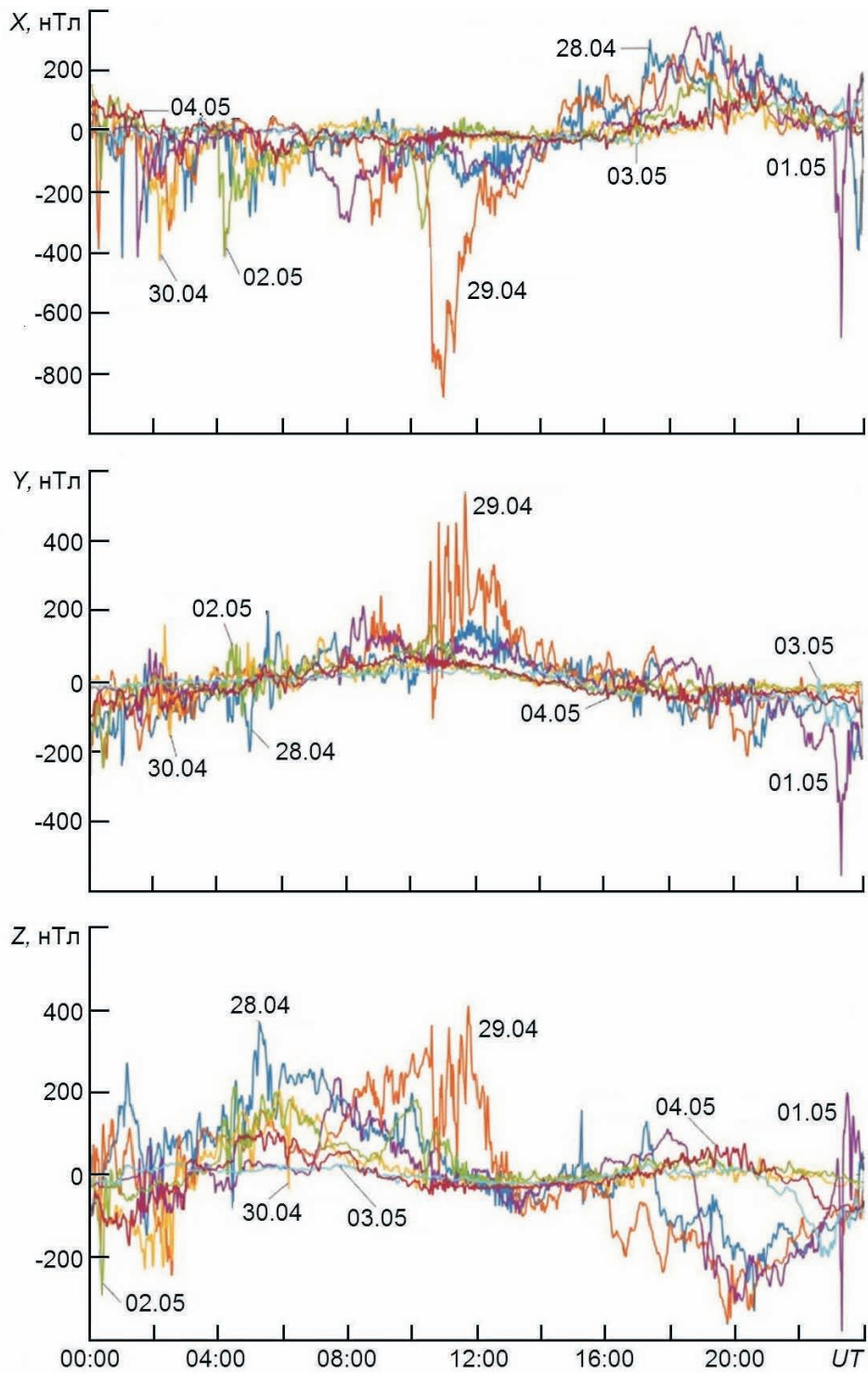


Рис. 3. Те ж для станції IQA

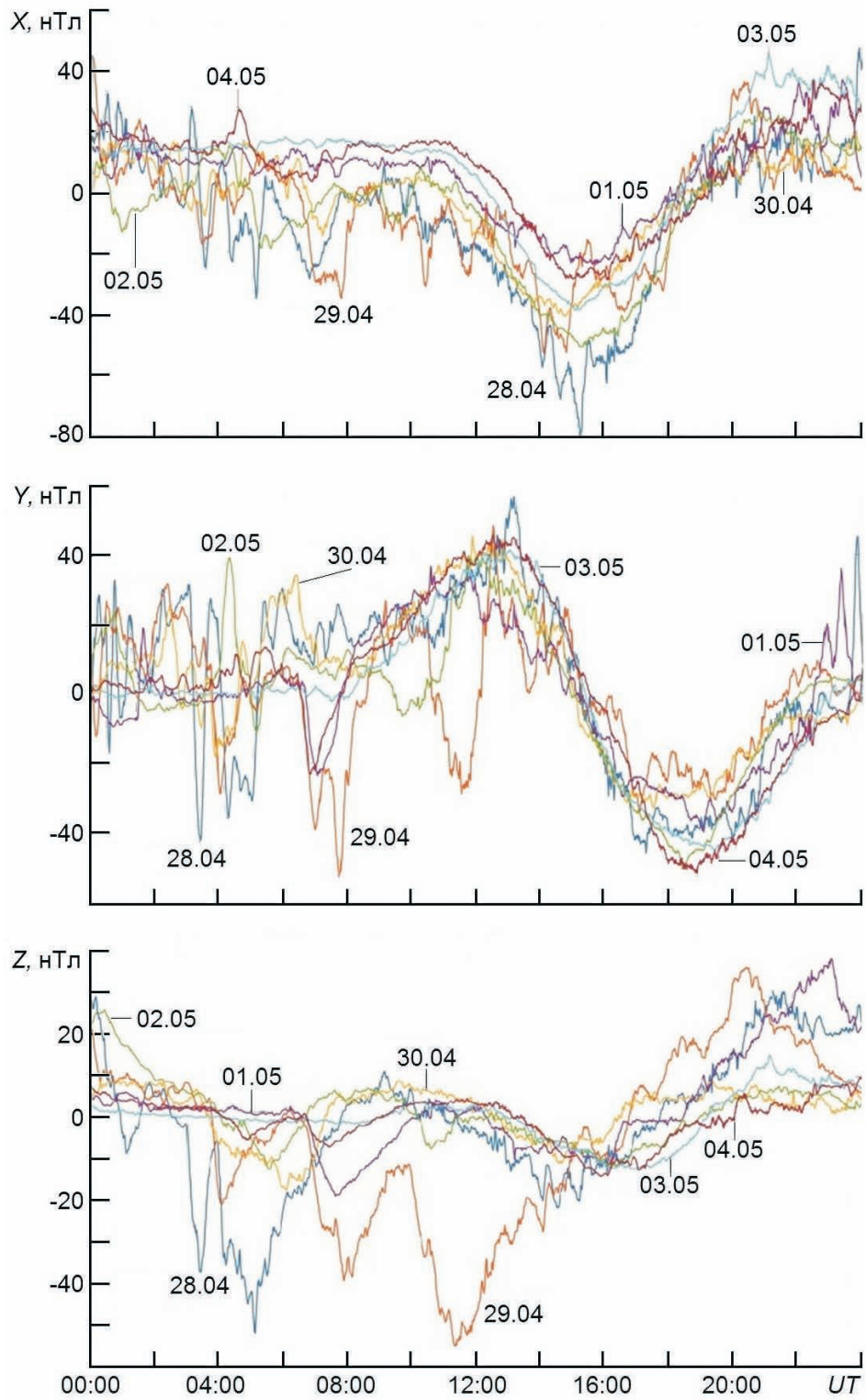


Рис. 4. Те ж для станції ОТТ



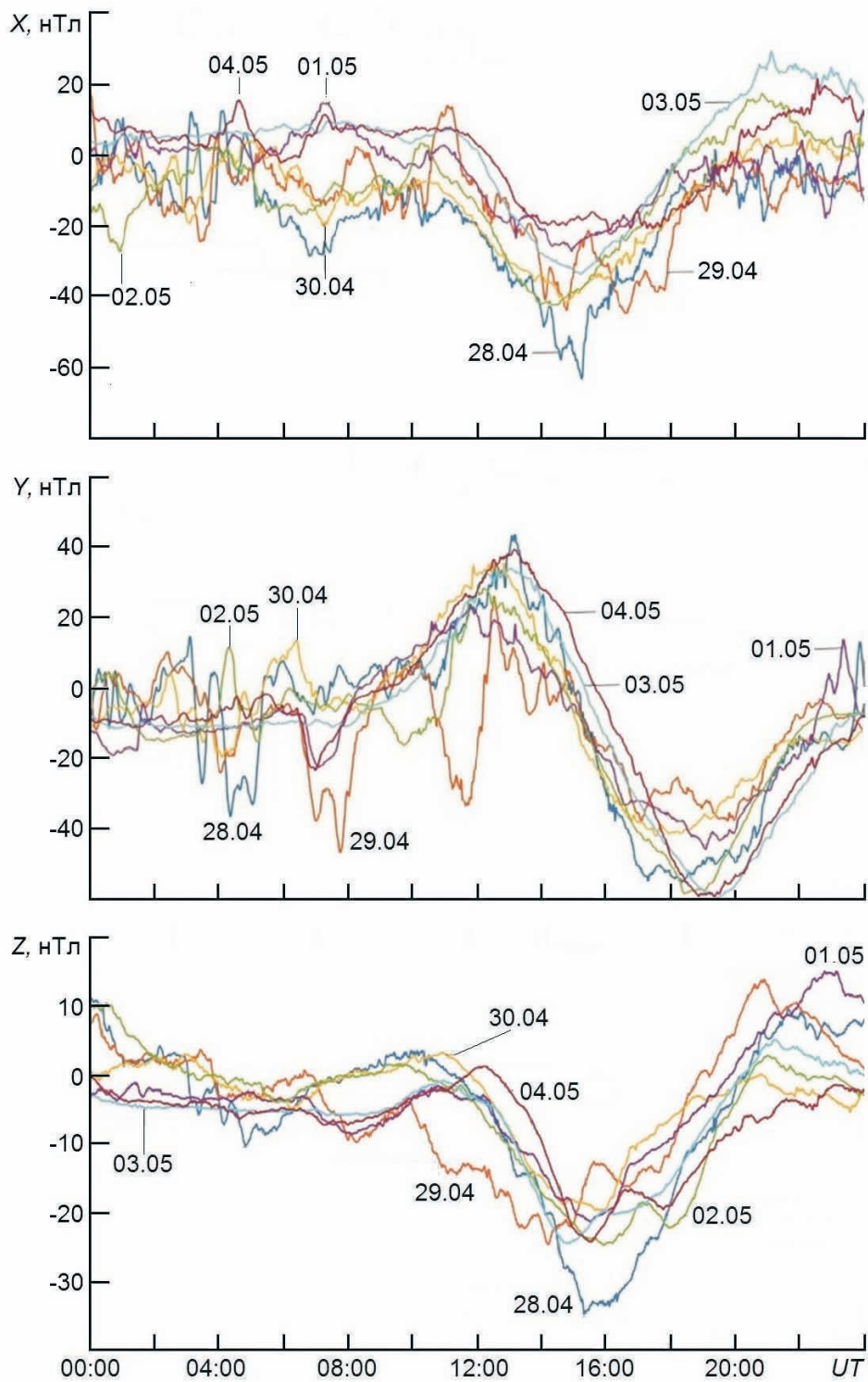


Рис. 5. Те ж для станції FRD

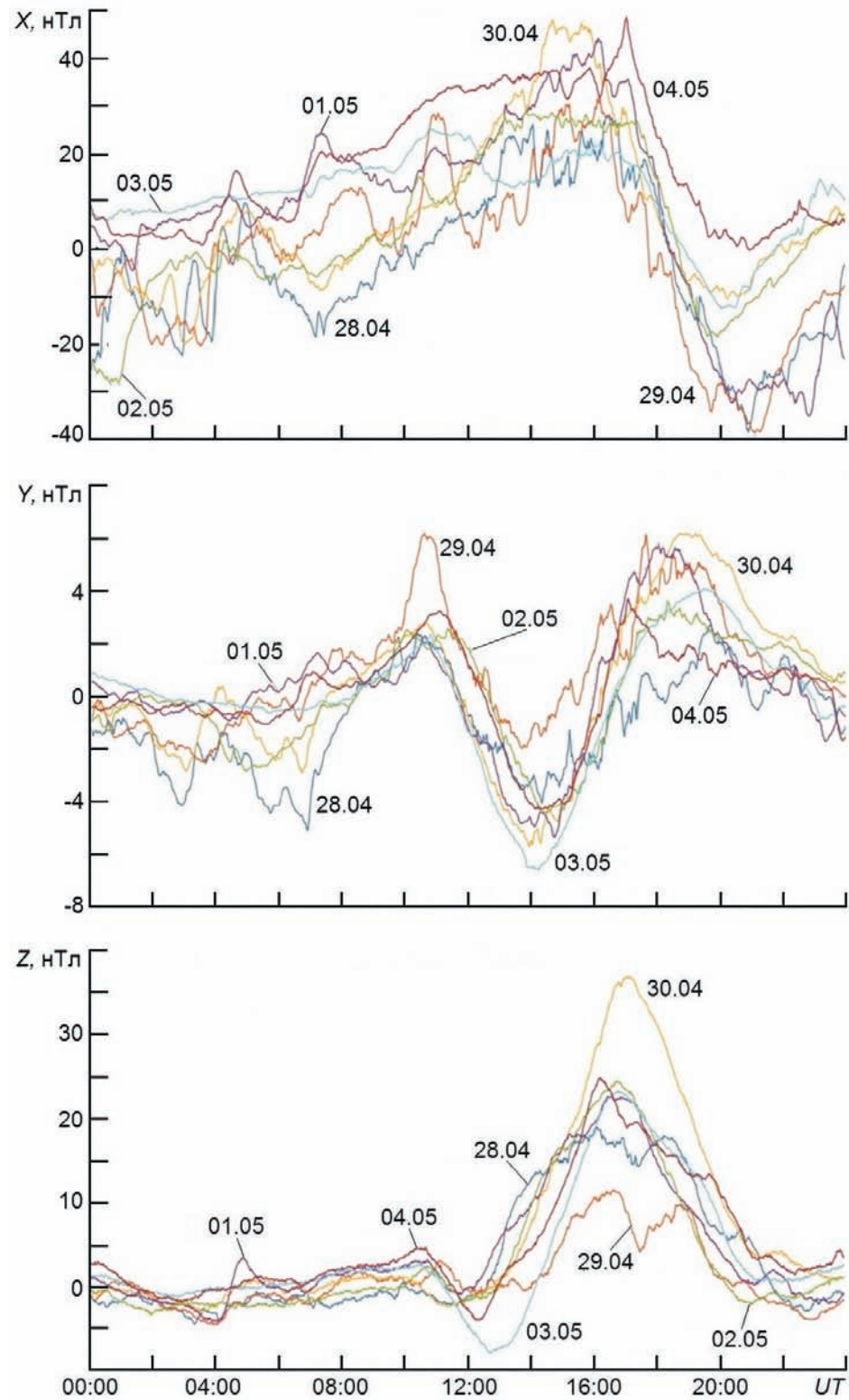


Рис. 6. Те ж для станції PИL

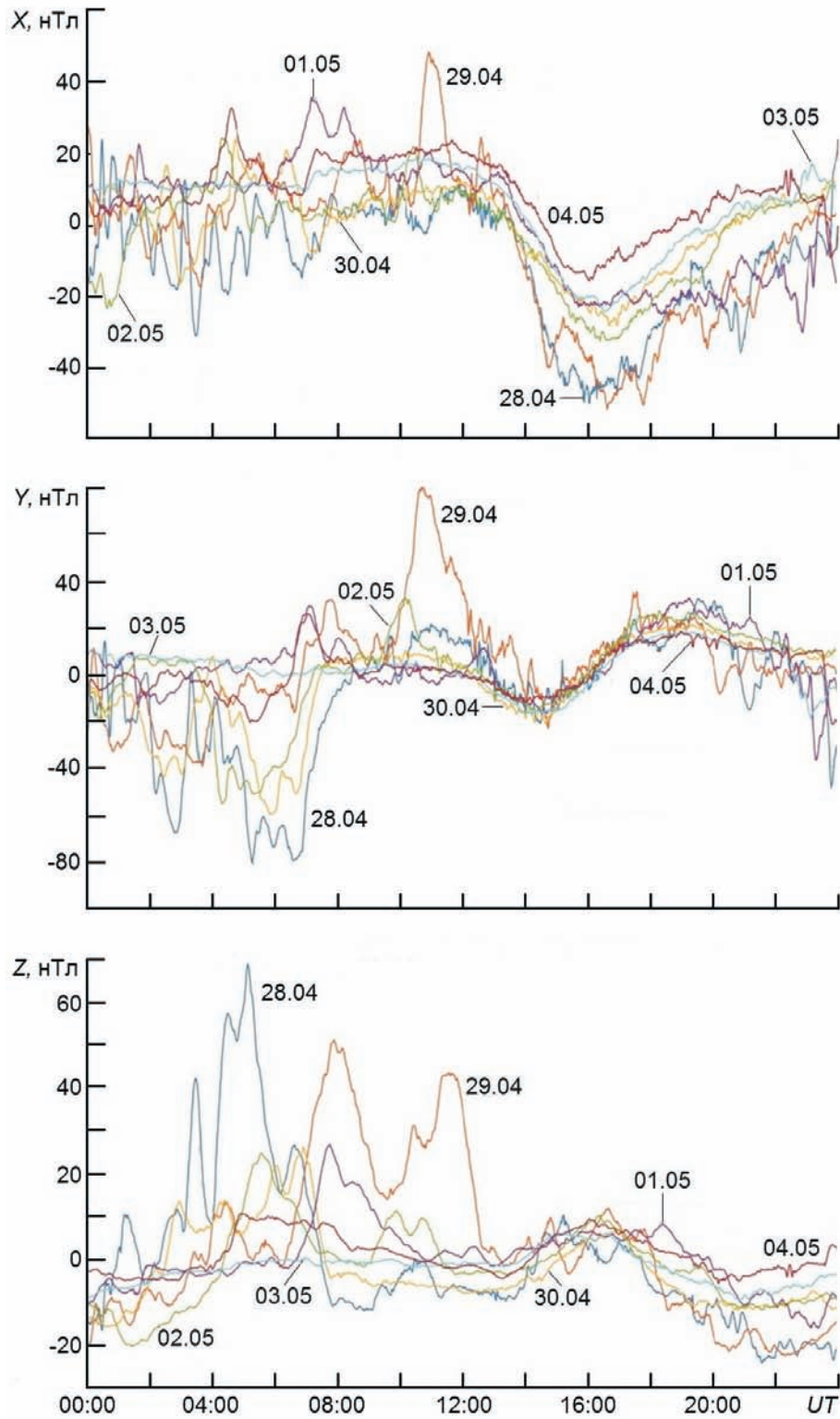


Рис. 7. Те ж для станції AIA

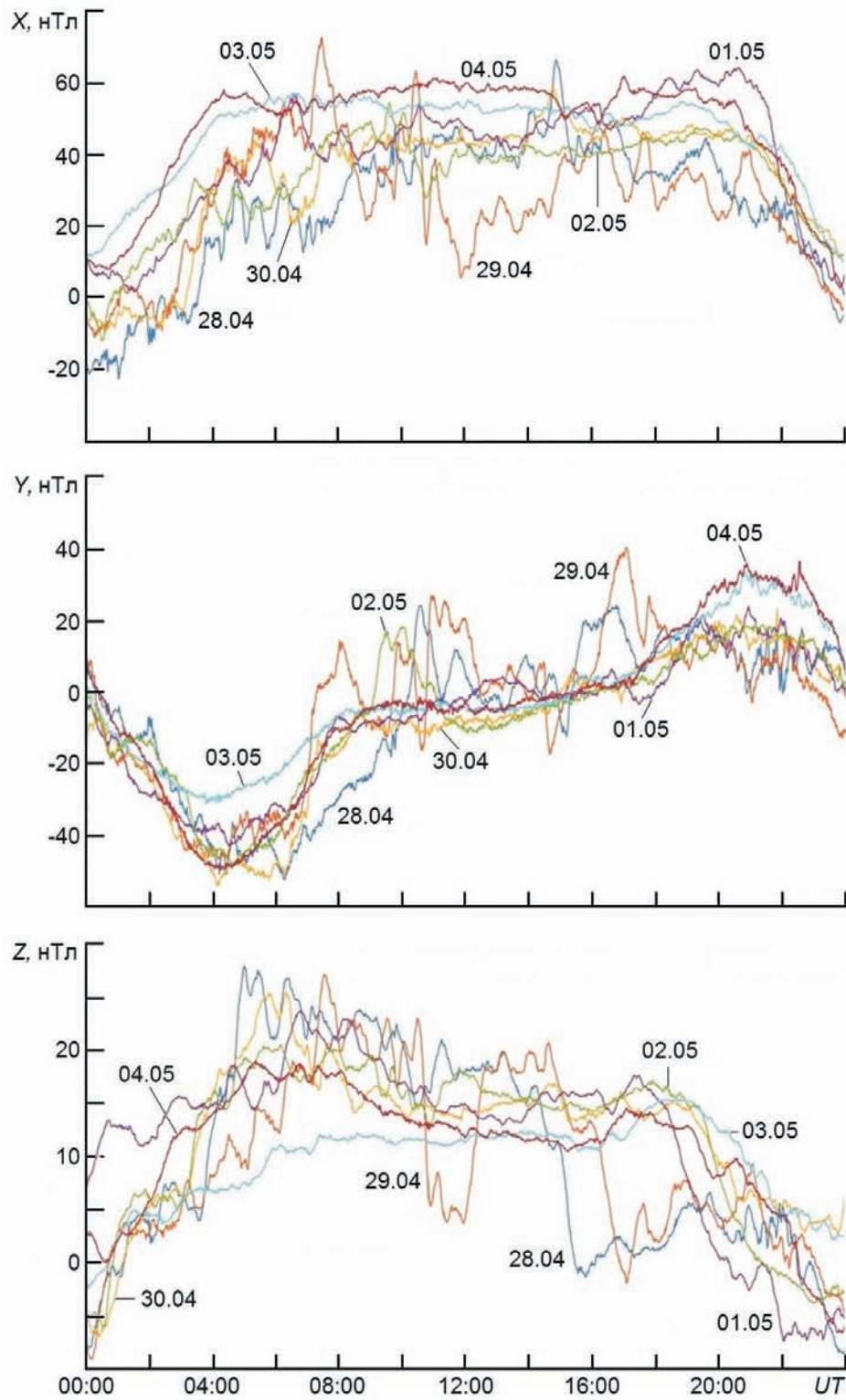


Рис. 8. Те ж для станції PET

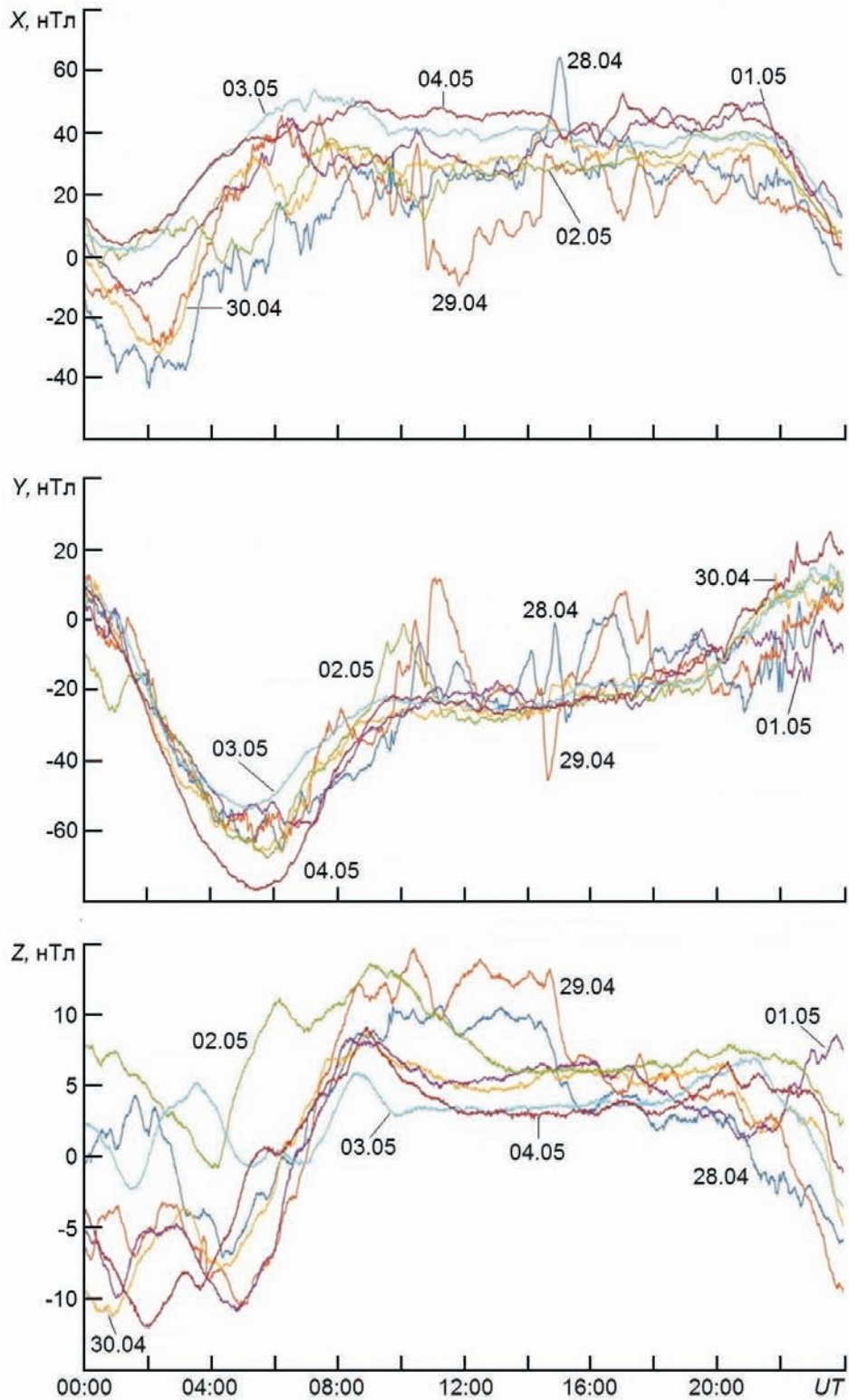


Рис. 9. Те ж для станції КНВ

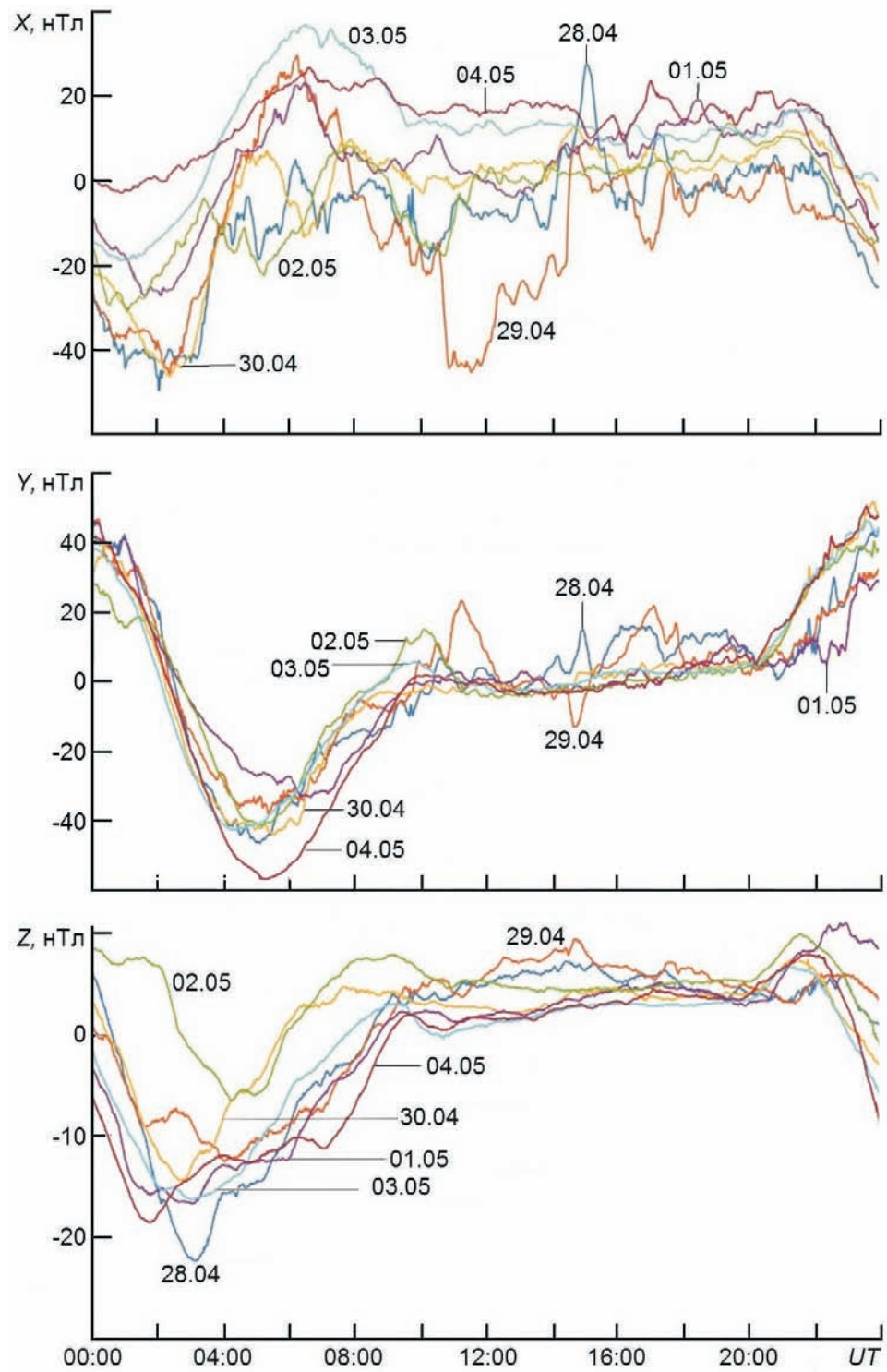


Рис. 10. Те ж для станції CYG

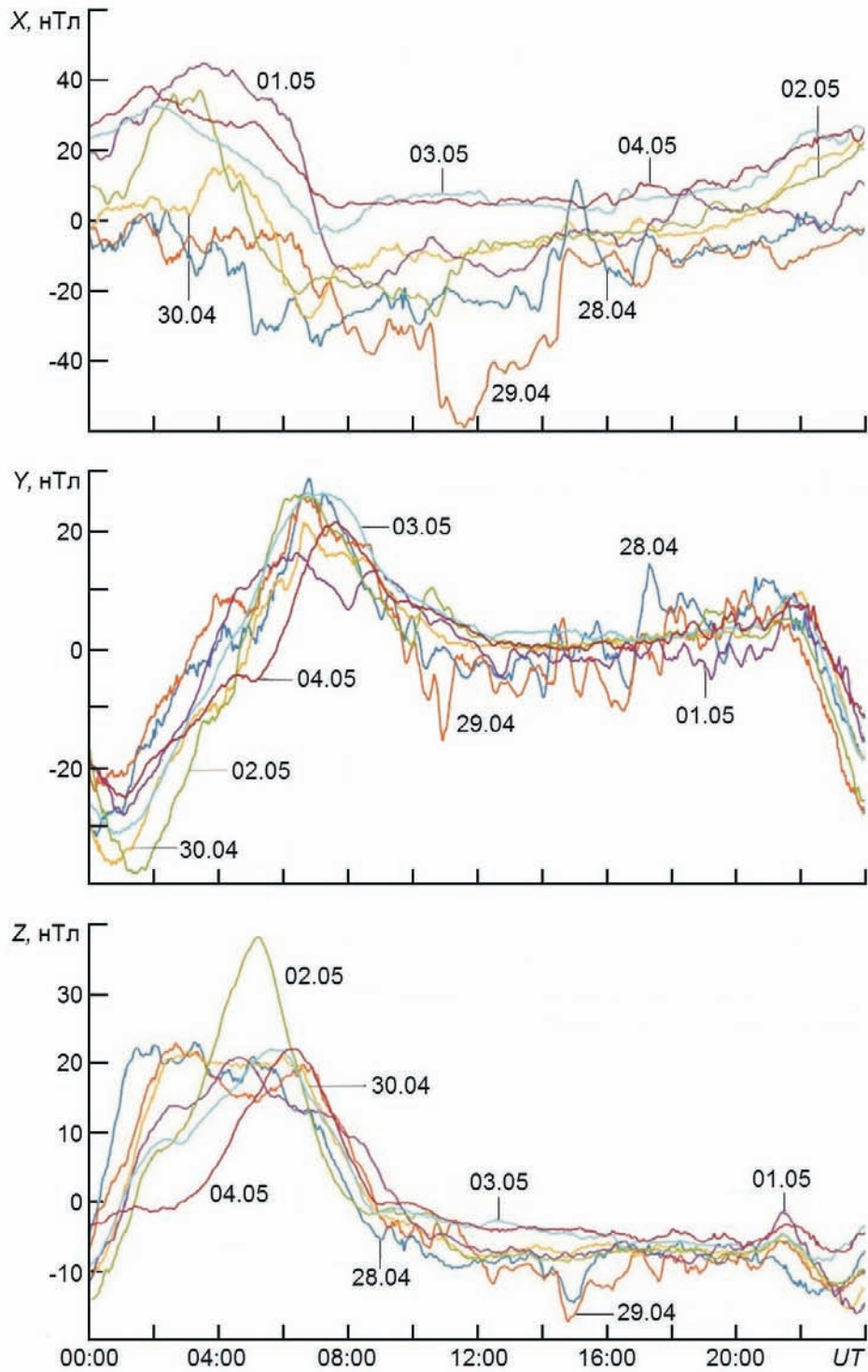


Рис. 11. Те ж для станції KDU

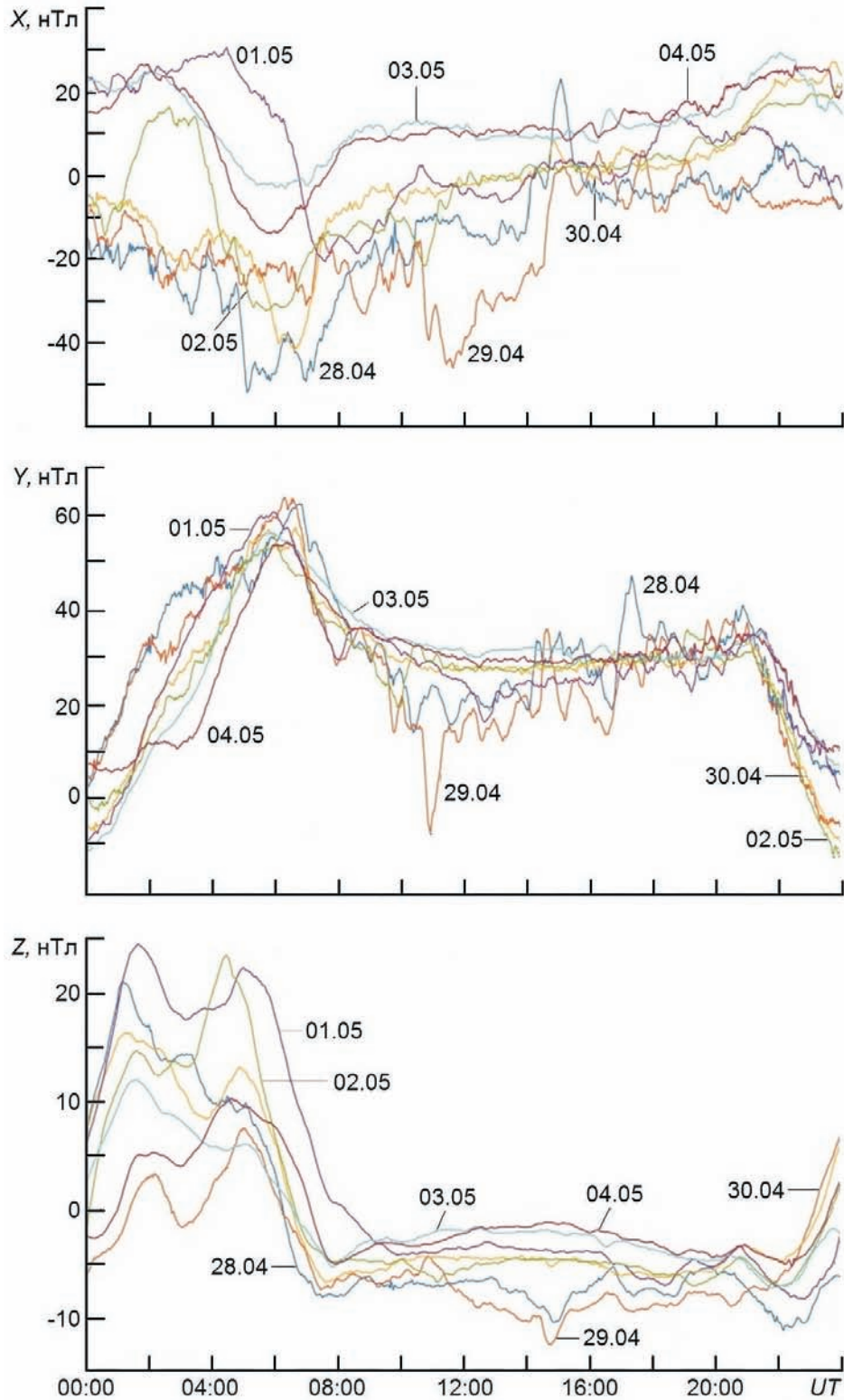


Рис. 12. Те ж для станції СТА



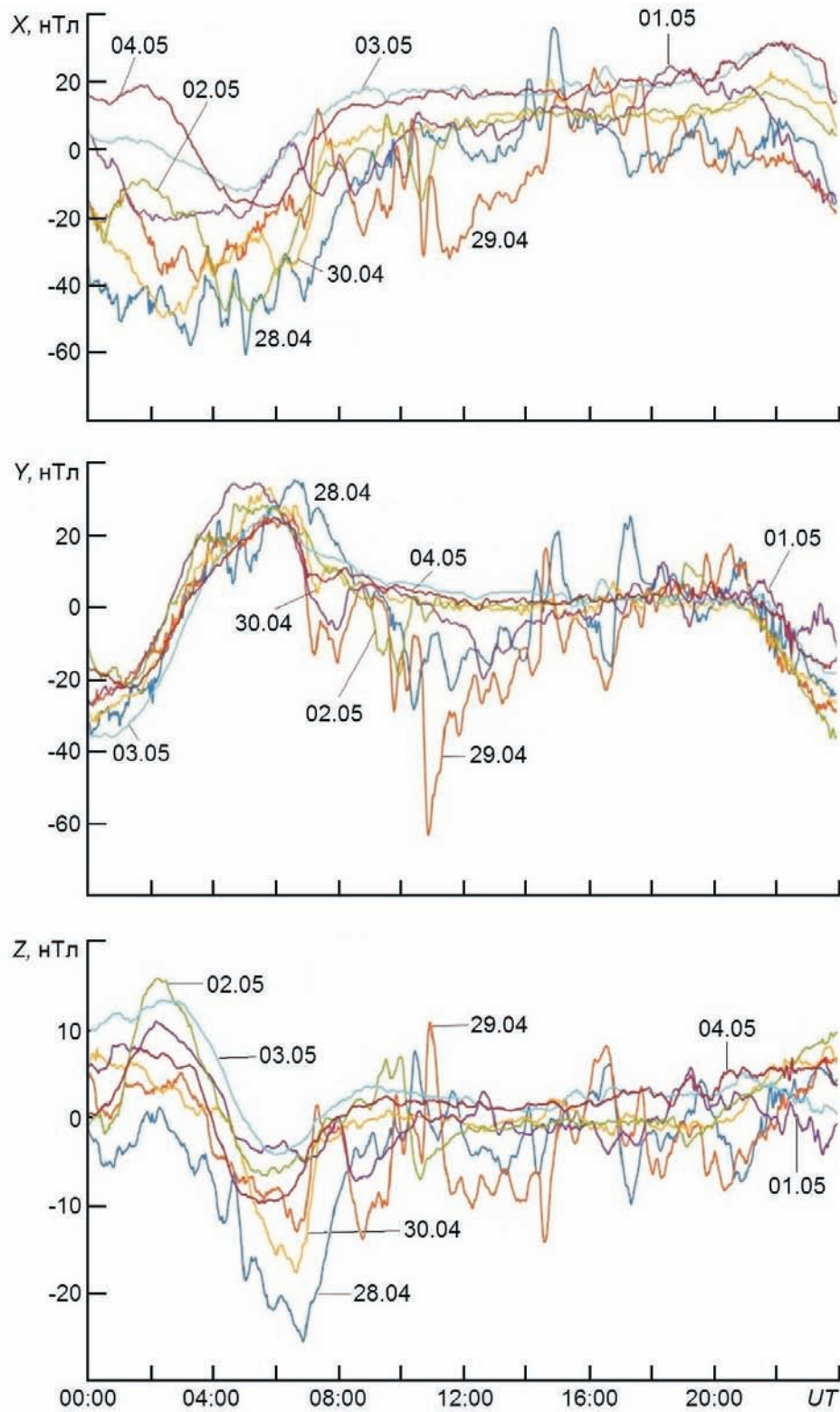


Рис. 13. Те ж для станції CNB

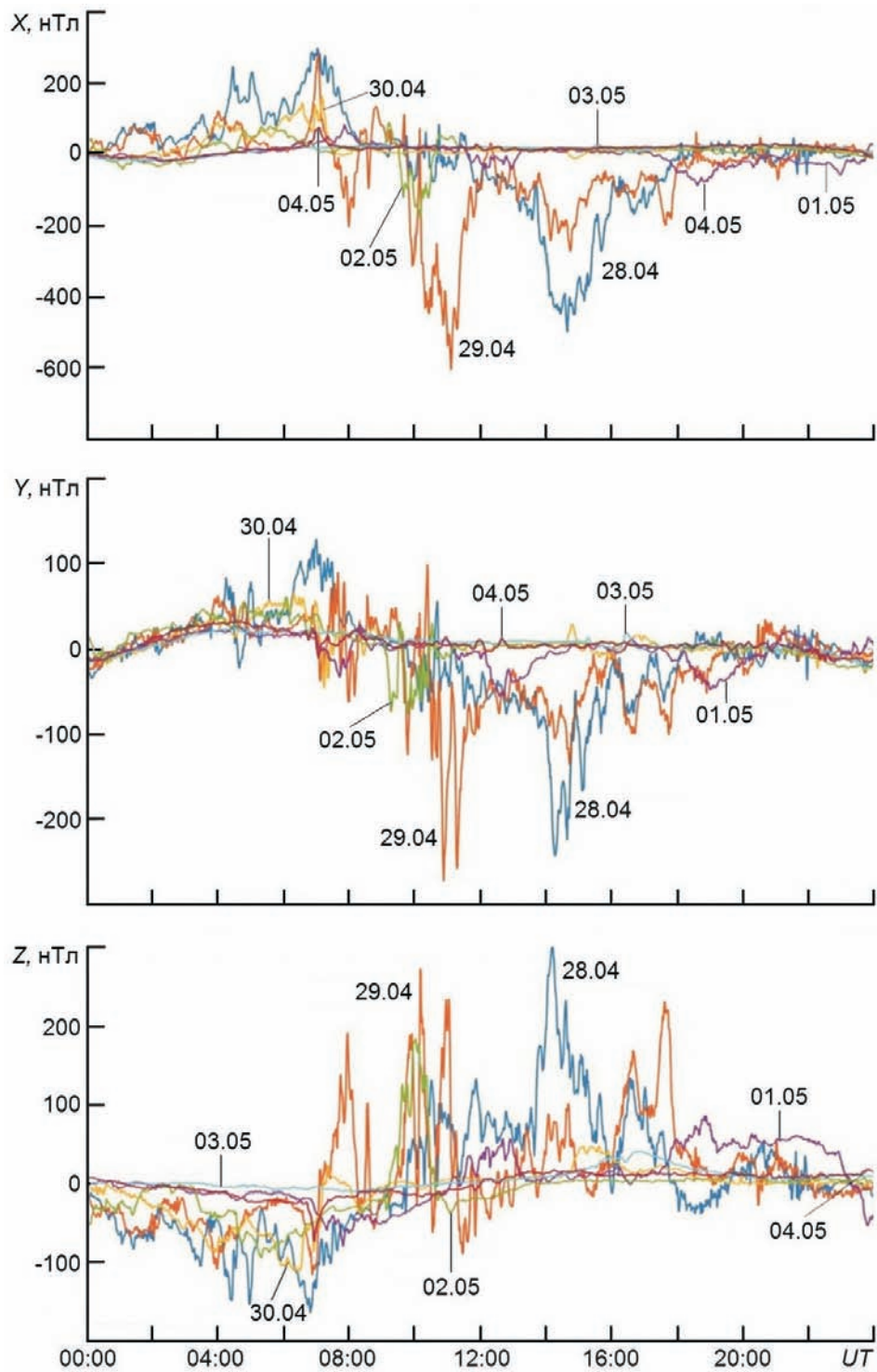


Рис. 14. Те ж для станції MCQ

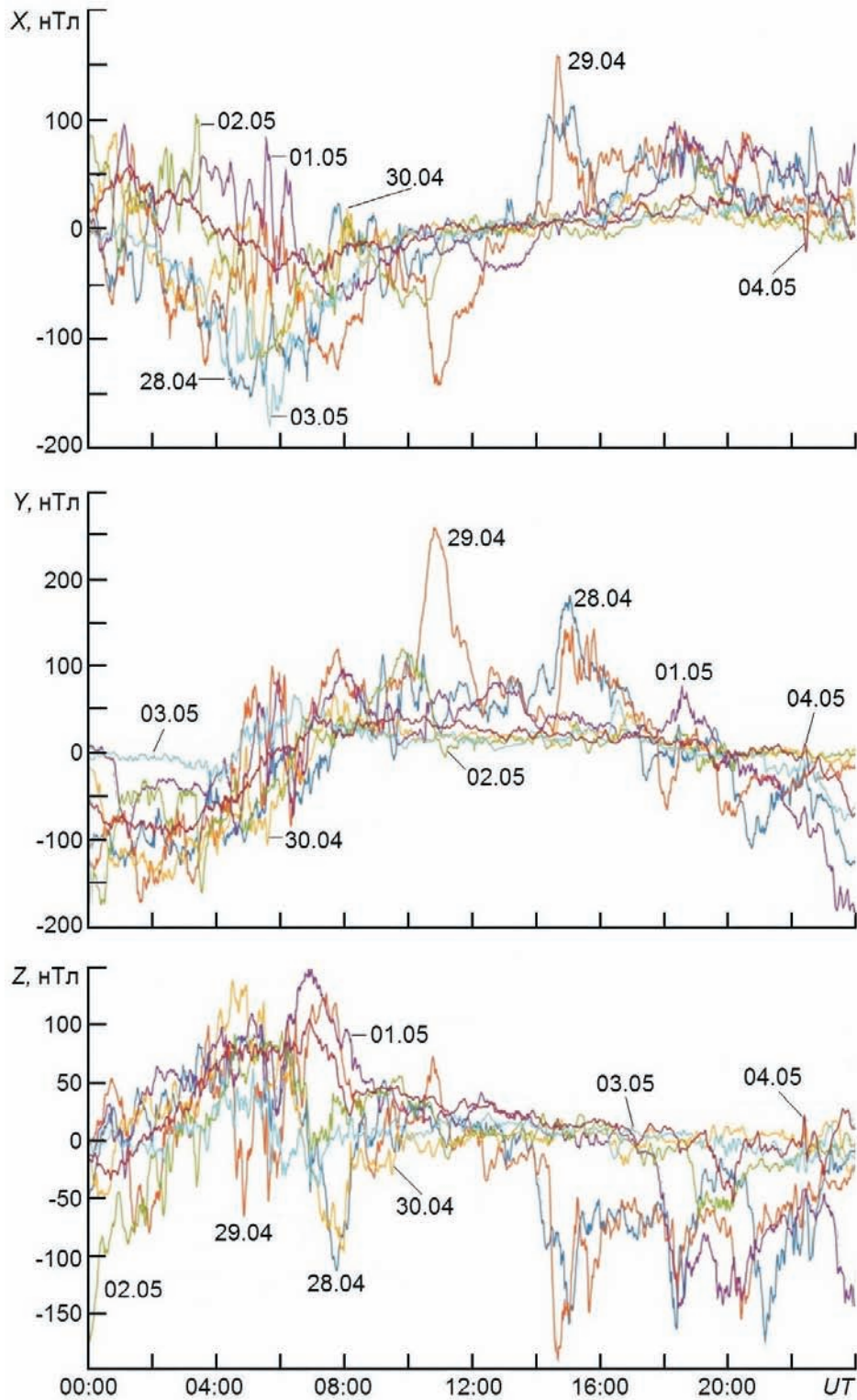


Рис. 15. Те ж для станції CSY

80 нТл (див. табл. 2). Ця та інші станції, що розглядаються далі, лежать у південній півкулі.

Станція KDU. Найбільш суттєві (до 60...65 нТл) варіації X-компонента мали місце 29 квітня та 1 травня 2023 р. (рис. 11). Досить значними (до 55...63 нТл) були варіації Y-компонента 2—3 травня 2023 р. (див. табл. 2).

Станція СТА. Розмах X-компонента до 45...50 нТл реєструвався з 28 квітня до 2 травня 2023 р. (рис. 12). Дещо більшим (до 55...65 нТл) був розмах для Y-компонента (див. табл. 2).

Станція CNB. Найбільші (до 50...60 нТл) варіації X- і Y-компонентів спостерігалися 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 13). При цьому розмах складав 80 нТл (див. табл. 2).

Станція MCQ. Для цієї станції магнітна буря найбільш яскраво виражена у X-компоненті 28—29 квітня 2023 р. Розмах сягав 700...770 нТл (рис. 14). Для інших компонентів він не перевищував 350...460 нТл (див. табл. 2).

Станція CSY. На високоширотній станції X- і Y-компоненти збурювалися найбільше 28 та 29 квітня 2023 р., а Z-компонент — 1 та 2 травня 2023 р. (рис. 15). Варіації сягали 270...420 нТл. У контрольні дні розмах не перевищував 150...190 нТл (див. табл. 2).

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

За даними космічної погоди обидві магнітні бурі 28—29 квітня та 1—2 травня 2023 р. були помірними. Як видно із проведеного аналізу, дні 28—29 квітня були більш збуреними, ніж 1—2 травня 2023 р. (див. табл. 2). Це можна пояснити тим, що буря 28—29 квітня 2023 р. була дещо інтенсивнішою ( $K_p \text{ max} = 4$ ), ніж 1—2 травня 2023 р. ( $K_p \text{ max} = 3.3$ ). Крім того, перша буря продовжувалась до 09:00 30 квітня 2023 р. і тривала 57 год. Буря 1—2 травня 2023 р. спостерігалася впродовж 21 год.

У контрольні дні варіації X- і Z-компонентів зазвичай були меншими в 1.3...2.1 раза. Різниця значень Y-компонента у дні з магнітними бурями та у контрольні дні була незначною.

Із аналізу табл. 2 випливає, що зменшення географічної широти супроводжувалося зменшенням геомагнітної активності. Виключенням є станція MCQ, де варіації рівня геомагнітного поля були майже на порядок більшими, ніж на інших станціях північної півкулі.

Цікаво порівняти дані станцій FRD та PIL, з одного боку, та дані станцій CYG та CNB, з іншого боку, які лежать приблизно на однаковій відстані від екватора, але в різних півкулях.

Із табл. 2 видно, що величина збурень на станціях FRD та PIL відрізнялася не більше, ніж в 1.1...1.5 раза. Ще меншою була відмінність варіацій для станцій CYG і CNB. Несуттєво також відрізнялися магнітні збурення для станцій, які мали близькі географічні координати, але лежали у західній (FRD, PIL) і східній (CYG, CNB) півкулях.

**Таблиця 2. Розмах варіацій компонентів геомагнітного поля (нТл) на різних станціях**

Станція	Компонент	28 квітня	29 квітня	1 травня	2 травня	3 травня	4 травня
ЗАХІДНА ПІВКУЛЯ							
GDH	X	380	550	340	270	280	240
	Y	310	500	370	350	290	200
	Z	780	650	550	430	120	240
IQA	X	750	1000	980	500	130	260
	Y	360	750	760	126	100	140
	Z	680	750	520	470	200	200
OTT	X	110	73	60	75	88	66
	Y	95	100	60	110	80	90
	Z	80	90	58	38	24	18
FRD	X	70	55	46	56	55	40
	Y	90	65	60	75	95	80
	Z	45	40	35	23	24	25
PIL	X	60	70	75	53	40	48
	Y	60	70	80	53	35	48
	Z	20	33	30	24	30	30
AIA	X	75	100	45	40	40	40
	Y	110	120	60	75	20	65
	Z	100	70	35	30	13	15
СХІДНА ПІВКУЛЯ							
PET	X	85	80	60	55	50	50
	Y	85	70	60	60	65	85
	Z	30	25	30	95	20	23
KHB	X	108	75	65	54	50	50
	Y	70	70	65	65	65	100
	Z	17	20	20	15	10	20
CYG	X	70	70	47	40	50	32
	Y	50	80	60	80	80	100
	Z	27	20	25	17	20	20
KDU	X	40	55	46	56	55	40
	Y	40	65	60	75	95	80
	Z	35	40	35	23	24	25
CTA	X	60	70	75	53	40	48
	Y	60	70	80	53	35	48
	Z	20	33	30	24	30	30
CNB	X	75	100	45	40	40	40
	Y	110	120	60	75	20	65
	Z	100	70	35	30	13	15
MCQ	X	770	700	100	250	140	80
	Y	400	360	60	100	20	20
	Z	460	350	120	280	30	20
CSY	X	270	300	170	220	190	100
	Y	300	420	270	290	140	150
	Z	220	260	300	270	90	140

Оскільки географічні довготи станцій помітно відрізнялися, то і моменти настання збурень були різними.

Таким чином, для помірних магнітних бур оцінено максимальний розмах варіацій компонентів геомагнітного поля у глобальних мас-

штабах у порівнянні з контрольними днями. Ці дані можуть використовуватися як реперні під час досліджень сильних магнітних бур.

## ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз часових варіацій рівня X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET, показав таке.

1. Встановлено межі варіацій рівня компонентів геомагнітного поля у глобальних масштабах у магнітоспокійних умовах і під час помірних магнітних бур.

2. У магнітоспокійних умовах розмах варіацій геомагнітного поля при зменшенні географічної широти поступово зменшувався від 200...260 до 30...50 нТл.

3. Протягом геомагнітних бур розмах варіацій X- і Z-компонентів збільшувався в 1.3...2.1 рази у порівнянні з розмахом у контрольні дні. Варіації Y-компонента були помітно меншими.

4. Варіації рівня всіх компонентів на станціях, що лежать приблизно на однаковій відстані від екватора, але в різних півкулях, були близькими. Це стосується як західної, так і східної півкулі.

5. Також близькими були варіації геомагнітного поля на станціях, що дислокувалися приблизно на одній широті, але в різних півкулях.

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476 та 0124U000478).

## REFERENCES

1. Abe O. E., Fakomiti M. O., Igboama W. N., Akinola O. O., Ogunmodimu O., Migoya-Orué Y. O. (2023). Statistical analysis of the occurrence rate of geomagnetic storms during solar cycles 20—24. *Advances in Space Res.*, 71(5), 2240—2251. DOI:10.1016/j.asr.2022.10.033.
2. Al Shidi Q., Pulkkinen T., Toth G., Brenner A., Zou S., Gjerloev J. (2022). A large simulation set of geomagnetic storms — Can simulations predict ground magnetometer station, observations of magnetic field perturbations? *Space Weather*, 20, id: e2022SW003049. DOI:10.1029/2022SW003049.
3. Benestad R. E. (2006). *Solar activity and Earth's climate*. Chichester, UK: Springer-Praxis, Springer. DOI:10.1007/3-540-30621-8.
4. Bothmer V., Daglis I. (2006). *Space Weather: Physics and Effects*. New York: Springer-Verlag.
5. Buonsanto M. (1999). Ionospheric storms — A review. *Space Sci. Revs.*, 88(3-4), 563—601.
6. Carlowicz M. J., Lopez R. E. (2002). *Storms from the Sun*. Washington, DC: Joseph Henry Press. DOI:10.17226/10249.

7. Chernogor L. F. (2011). The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.*, 32, 3199—3218. DOI:10.1080/01431161.2010.541510.
8. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, 27(1), 3—77. DOI:10.15407/knit2021.01.003.
9. Chernogor L. F. (2021). Statistical characteristics of geomagnetic storms in the 24th cycle of solar activity. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, 37(4), 193—199. DOI:10.3103/S0884591321040048.
10. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geospace storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.
11. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. (2021). Effects of the strong ionospheric storm of August 26, 2018: Results of multipath radiophysical monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*, 61(1), 73—91. DOI:10.1134/S001679322006002X.
12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. (2007). Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 7(GI3001). DOI:10.1029/2005GI000125.
13. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth—Atmosphere—Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.*, 13, 120—137.
14. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2020). Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7-9, 2017. *Space Sci. and Technol.*, 26(2), 72—83. DOI:10.15407/knit2020.02.072.
15. Daglis I. A. (2001). *Space Storms and Space Weather Hazards*. New York: Springer Dordrecht. <https://www.springer.com/gp/book/9781402000300>.
16. Danilov A. D., Laštovička J. (2001). Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomag. Aeron.*, 2, 209—224.
17. Danilov A. D., Morozova L. D. (1985). Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomag. Aeron.*, 25, 705—721.
18. De Abreu A. J., Correia E., De Jesus R., Venkatesh K., Macho E. P., Roberto M., (2023). Statistical analysis on the ionospheric response over South American mid- and near high-latitudes during 70 intense geomagnetic storms occurred in the period of two decades. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 245, id: 106060. DOI:10.1016/j.jastp.2023.106060.
19. Fagundes P. R., Tsali-Brown V. Y., Pillat V. G., Arcanjo M. O., Venkatesh K., Habarulema J. B. (2023). Ionospheric storm due to solar Coronal mass ejection in September 2017 over the Brazilian and African longitudes. *Advances in Space Res.* 71(1), 46—66. DOI:10.1016/j.asr.2022.07.040.
20. Freeman J. W. (2001). *Storms in Space*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1046/j.1365-246X.2002.01771.x.
21. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. (1997). How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? *Magnetic storms*. Eds Tsurutani B. T. et al. *Geoph. Monog. Ser.*, 98, 203—226. DOI:10.1029/GM098p0203.
22. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. (1994). What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, 99, 5771—5792. DOI:10.1029/93JA02867.
23. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7—10, 2004. *Geomagn. Aeron.*, 47, 720—738. DOI:10.1134/S0016793207060059.

24. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2003). Radio studies of processes in the ionosphere associated with the strongest September 25, 1998 geomagnetic storm. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 9, 57—94 (in Russian).
25. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Specific features of the ionospheric storm of March 20-23, 2003. *Geomagn. Aeron.*, 45(6), 745—757.
26. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 1. *Space Science and Technology*, 13(5), 58—76. DOI:10.15407/knit2007.05.058.
27. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe, 2. *Space Science and Technology*, 13(5), 77—96. DOI:10.15407/knit2007.05.077.
28. Grigorenko E. I., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F., Chernyaev S. V. (2005b). Dynamic processes in the ionosphere during the severe magnetic storm of May 30-31, 2003. *Geomagn. Aeron.*, 45(6), 758—777.
29. Hsu C.-T., Pedatella N. M. (2023). Effects of forcing uncertainties on the thermospheric and ionospheric states during geomagnetic storm and quiet periods. *Space Weather*, 21, id: e2022SW003216. DOI:10.1029/2022SW003216.
30. Kamide Y., Maltsev Y. P. (2007). *Geomagnetic Storms*. In: Kamide Y., Chian A. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 355—374. DOI:10.1007/978-3-540-46315-3\_14.
31. Katsko S. V., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2021). Features of the ionospheric storm on December 21-24, 2016. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, 37(2), 85—95. DOI:10.3103/S0884591321020045.
32. Katsko S. V., Emelyanov L. Ya., Domnin I. F., Chernogor L. F. (2020). Ionosphere response to geomagnetic storms on 7-8 September 2017 over Kharkiv (Ukraine). *URSI GASS*, Rome, Italy, 29 August — 5 September 2020. DOI: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232440.
33. Koskinen H. E. J. (2011). *Physics of space storms. From Solar Surface to the Earth*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. DOI:10.1007/978-3-642-00319-6.
34. Laskar F. I., Sutton E. K., Lin D., Greer K. R., Aryal S., Cai X. (2023). Thermospheric temperature and density variability during 3-4 February 2022 minor geomagnetic storm. *Space Weather*, 21, id: e2022SW003349. DOI:10.1029/2022SW003349.
35. Laštovička J. (1996). Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 831—843. DOI:10.1016/0021-9169(95)00106-9.
36. Lilensten J., Bornarel J. (2006). *Space Weather, Environment and Societies*. Berlin/ New York: Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9781402043314>.
37. Lin D., Wang W., Merkin V. G., Huang C., Oppenheim M., Sorathia K. (2022). Origin of dawnside subauroral polarization streams during major geomagnetic storms. *AGU Advances*, 3, id:e2022AV000708. DOI:10.1029/2022AV000708.
38. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2021). Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August-2 September 2019 geospace storm: influence on high frequency radio wave characteristics. *Ann. Geophys.*, 39, 657—685. DOI:10.5194/angeo-39-657-2021.
39. Luo Y., Chernogor L. F. (2022). Characteristic features of the magnetic and ionospheric storms on December 21—24, 2016. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, 38(5), 262—278. DOI:10.3103/S0884591322050051.
40. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P. (2022). Magneto-ionospheric effects of the geospace storm of March 21-23, 2017. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, 38(4), 210—229. DOI:10.3103/S0884591322040055.



41. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Shulga S. N. (2021). Geospace storm effects on August 5-6, 2019 (in Ukrainian). *Space Science and Technology*, 27(2), 45—69. DOI:10.15407/knit2021.02.045.
42. Moldwin M. (2008). *An introduction to space weather*. Cambridge: Cambridge University Press.
43. Oikonomou C., Haralambous H., Paul A., Ray S., Alfonsi L., Cesaroni C., Sur D. (2022). Investigation of the negative ionospheric response of the 8 September 2017 geomagnetic storm over the European sector. *Advances in Space Res.*, 70(4), 1104—1120. DOI:10.1016/j.asr.2022.05.035.
44. Prölss G. W. (1995). *Ionospheric F-region storms*. Handbook of Atmospheric Electrodynamics. Ed. H. Volland. Florida, USA: CRC Press, Boca Raton. Vol. 2, 195—248.
45. Prölss G. W. (1998). *Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere*. Magnetic storms. Eds B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, Y. Kamide, J. K. Arballo *Geophys. Monog. Ser.*, 98, 249—290. DOI:10.1029/GM098p0227.
46. Qian L., Wang W., Burns A. G., Chamberlin P. C., Coster A., Zhang S.-R., Solomon S. C. (2019). Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6-11 September 2017. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 124, 2298—2311. DOI:10.1029/2018JA026175.
47. Song P., Singer H., Siscoe G. (2001). *Space Weather (Geophysical Monograph)*. Washington, DC: American Geophysical Union. DOI:10.1002/9781118668351.
48. Tariq M. A., Yuyan Y., Shah M., Shah M. A., Iqbal T., Liu L. (2022). Ionospheric-Thermospheric responses to the May and September 2017 geomagnetic storms over Asian regions. *Advances in Space Res.*, 70(11), 3731—3744. DOI:10.1016/j.asr.2022.08.050.

*L. F. Chernogor, M. Yu. Holub*

V. N. Karazin Kharkiv National University  
4 Svoboda Square, Kharkiv, 61022 Ukraine

#### MODERATE MAGNETIC STORMS ON APRIL 28 — MAY 2, 2023

Magnetic storm, ionospheric storm, atmospheric storm and electrical storm are the components of a geospace storm resulting from a solar storm. In the literature, the main attention is paid to the analysis of severe and extreme geospace storms. It is these storms that have the greatest impact on the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. They are most dangerous for space-based and ground-based technological systems. Such storms have a significant impact on human well-being and health. Minor and moderate storms are much less studied than severe and extreme ones. There are good reasons to believe that such storms can have some impact on the systems and people. It is important that the frequency of occurrence of moderate storms is much greater than the frequency of occurrence of severe storms. All this determined the relevance of this paper, which consists in the study of magnetic disturbances that arise during moderate geospace storms, which receive undeservedly little attention. The purpose of this paper is to analyze on a global scale the temporal variations of geomagnetic field components during moderate magnetic storms on April 28—29 and May 1—2, 2023. The latitudinal dependence of the geomagnetic field components temporal variations during two moderate magnetic storms in April—May 2023 and on reference days was analyzed on a global scale using the data of the global network of INTERMAGNET stations. The limits of fluctuations in the level of the geomagnetic field under quiet conditions and during moderate storms were estimated. The range of variations in the geomagnetic field level under quiet conditions decreased

from 200...260 to 30...50 nT with decreasing geographic latitude. During the storms, these limits increased 1.3...2.1 times. The variations in the level of components at stations equidistant from the equator were close. This is true for both the western and eastern hemispheres. The fluctuations of the geomagnetic field level at the stations operating approximately at the same latitude, but in different hemispheres, were also close.

**Keywords:** moderate magnetic storm, latitudinal dependence, magnetic disturbance, level fluctuation, range of variations.

Стаття надійшла до редакції 12.08.2023

Після доопрацювання 20.04.2024

Прийнята до друку 15.08.2024