

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.062>

УДК 523.98; 629.783

А. І. Білінський, О. А. Баран, М. І. Стоділка,
Е. Б. Вовчик, М. М. Ковальчук

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія 8, м. Львів, Україна, 79005
e-mails: andrii.bilinskyi@lnu.edu.ua, lesiaab@gmail.com,
evavovchyk@ukr.net, marmyr.kovalchuk@gmail.com

Статистичний аналіз орбітального руху вибраних штучних супутників Землі за період 24-го циклу сонячної активності

Проведено статистичний аналіз вибраних параметрів сонячної активності та орбітального руху штучних супутників Землі протягом 24-го циклу сонячної активності. Для дослідження були вибрані неактивні супутники, ступені ракет-носіїв та їхніх частин, що рухаються переважно на низьких орбітах. Застосовано різні алгоритми аналізу до часових рядів потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ та розрахованого темпу гальмування dP/dt досліджуваних космічних об'єктів: оцінено їхні річні статистичні показники, досліджено ці параметри на періодичність (вейвлет-аналіз), проведено пробну адитивну декомпозицію на тренд і сезонну складові. Отримано, що темп гальмування супутників в околі максимуму сонячної активності (2012—2014 рр.) збільшується у 10 разів. Для потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ та кінематичного параметру dP/dt космічних об'єктів 06073 і 31117 (згідно із нумерацією USSPACECOM) підтверджено сезонні зміни, циклічність із періодом 27 діб тощо. Виявлено чітку антикореляцію між трендами параметрів $F_{10.7}$ та dP/dt у межах $-0.73 \dots -0.95$ для об'єкта 31117 у період 2011—2018 рр., у межах $-0.82 \dots -0.95$ для об'єкта 37794 у період 2012—2018 рр.

Ключові слова: штучні супутники Землі, елементи орбіт, сонячна активність, потік радіовипромінювання Сонця, часовий ряд, статистичний аналіз.

ВСТУП

Великий вплив на рух та функціонування ШСЗ має космічна погода, параметри якої зазнають регулярних часових змін у діапазоні від доби до 11-річного сонячного циклу та довших періодів, таких як великі сонячні максимуми та мінімуми [18]. Під час екстремальної космічної погоди на деякі супутники може впливати навколишнє середовище, рівні збурення якого перевищують порогові значення окремих технічних характеристик цих супутників [8]. З іншого боку, всебічні статистичні дослідження мають забезпечити надійну основу для кількісного прогнозу небезпечних умов і дозволити вживати профілактичні заходи щодо зменшення ризику руйнування супутників [11, 13]. Контроль варіацій поведінки ШСЗ на орбіті вимагає довготривалих спостережень та аналізу складових факторів, що її збурюють.

Наша робота практично є продовженням досліджень [5, 14—16] з використанням більшого обсягу даних про орбітальні параметри супутників та розширенням часового проміжку, на якому проводився аналіз. Так, у роботі [5] було проаналізовано понад 4 тис. супутників, але лише протягом одного 2007 року. Основна увага була спрямована на дослідження балістичного параметра B^* , що відповідає за врахування гальмівного впливу атмосфери. У роботі [14] за період з жовтня 2003 р. по грудень 2004 р. серед інших супутників досліджується і орбітальний рух космічного об'єкта (КО) 25860 (згідно із нумерацією КО у каталозі USSPACECOM [21]), відомого як «Океан-О» — попередника українських супутників серії «Січ» [1]. В роботах [15, 16] проведено комплексне дослідження впливу сонячної та геомагнітної активності на динаміку орбітальних параметрів ШСЗ протягом 2012—2014 рр. (в околі максимуму 24-го циклу сонячної активності).

Мета нашої роботи — виконати початковий статистичний аналіз реальних (попередньо профільтованих) даних, що характеризують сонячну активність протягом цілого 11-річного циклу, та даних орбітального руху низькоорбітальних штучних супутників Землі в цей період, випробувати різні алгоритми аналізу часових рядів і зробити висновки про доцільність їхнього застосування.

ВИБІР ДАНИХ ДЛЯ АНАЛІЗУ

Для розрахунків ми взяли часовий інтервал з 1 січня 2009 р. по 31 грудня 2019 р., що вкладається у часові рамки 24-го циклу активності Сонця. Як параметр сонячної активності використано лише добові дані про потік радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ на довжині хвилі $\lambda = 10.7$ см [7, 17] (рис. 1).

Для дослідження ми вибрали такі КО, які у період 24-го циклу сонячної активності (2009—2019 рр.) були переважний час у пасивному стані, на низькій або ексцентричній орбіті із малим перигеєм та з

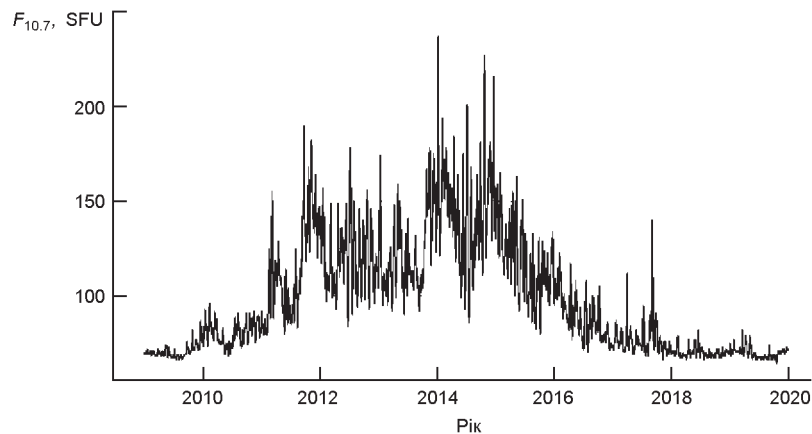


Рис. 1. Потік радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ протягом 24-го циклу сонячної активності

великим значенням ефективної площі КО при радіолокаційних спостереженнях (Radar Cross Section — RCS). Серед них є низка українських супутників та ракет-носіїв (РН), а також ті, що розглядались у наших попередніх дослідженнях (див. роботи [15, 16] та публікацію у цьому ж журналі за 2017 р., № 6). Основні дані про досліджувані КО [4, 21] для загальної інформації про характер їхнього руху наведено у табл. 1.

Слід зазначити, що український супутник, який планується вивести на орбіту у 2021 р. («Січ-2-1(30)» [1]) є фактично повним аналогом до супутника 31117, виведеного на орбіту в 2007 р., та супутника 37794, виведеного на орбіту в 2011 р. Тому їм буде приділено особливу увагу.

Для усіх даних було відфільтровано викиди із найбільшими значеннями. Також було проведено, за необхідності, процедуру передискретизації — 1 добі відповідає 1 набір даних, у році є 365 днів. Таким чином, для аналізу було використано часові ряди без пропусків даних із однорідною часовою шкалою.

БАЗОВИЙ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ УСІЄЇ ВИБІРКИ ДАНИХ

Зазвичай для аналізу орбітальних даних у форматі TLE (Two-Line Element set — дворядковий набір елементів орбіти супутників) використовується параметр B^* — так званий балістичний коефіцієнт [5]. Але оскільки у алгоритм його розрахунку закладено спрощення моделі SGP4 (Simplified General Perturbations — узагальнені спрощені збурення) [22], за рахунок чого він може набувати від’ємних значень, що не мають фізичного сенсу, то для аналізу ми обрали інші параметри.

У цій роботі ми аналізуємо темп dP/dt гальмування орбітального руху супутників, тобто зміну з часом періоду їхнього обертання навколо Землі, приведену в одиницях хвилин за добу. Цей кінематичний

параметр можна розрахувати із даних у форматі TLE [22] за формулою

$$\frac{dP}{dt} = 2880 \frac{(1/2)dN / dt}{N^2},$$

де P — період обертання навколо Землі, N — кількість обертів за добу.

Такий наш вибір величини для аналізу не випадковий, оскільки він робить часовий ряд більш придатним для досліджень [10]. Загальний вигляд часової залежності розрахованого параметру dP/dt для вибраних КО протягом заданого періоду часу наведено на рис. 2.

Один із вибраних згідно із згаданими вище критеріями відбору КО, а саме 21656 (третій ступінь РН «Циклон-3»), має темп гальмування dP/dt пекулярного нефізичного характеру (рис. 3). Окрім того, 12 лютого 2020 р. цей КО самовільно зруйнувався на орбіті [19].

Як видно із рис. 2 та 3, для деяких КО вибраний параметр приймає додатні значення — це може свідчити про зростання періоду обертання, тобто віддалення супутника від Землі. Чи це всього лише «ефект» моделі SGP4, чи є результатом якогось резонансного ефекту — відповідь на це питання потребує додаткового аналізу.

Таким чином, із даної вибірки супутників можна виділити три групи за характером зміни орбітального періоду:

— перша група — із нестационарною швидкістю зміни періоду обертання, яка практично є незмінною у мінімумі сонячної активності (КО 02801, 04047, 15354, 23560, 23657, 23659, 25860, 25861, 27386, 28812, 28813, 31117, 37794, 40042, 42732);

— друга група — із явно вираженими періодичними змінами тривалістю порядку 1 року (КО 06073, 21941, 28811, 32261, 38015) — як видно із табл. 1, це КО із ексцентриситетом понад 0.01;

— третя група — із пекулярним характером швидкості зміни орбітального руху (рис. 3) — єдиний КО 21656 із даної вибірки.

Одними із найпростіших статистичних характеристик [12] рядів даних є середнє значення, стандартне відхилення та кореляція (якщо йде мова про порівняння двох часових рядів).

У табл. 2 приведено значення річних статистичних характеристик для кінематичного параметру dP/dt вибраних супутників у порівнянні із потоком $F_{10.7}$ радіовипромінювання Сонця для кожного року 24-го циклу сонячної активності: середнє, стандартне відхилення та коефіцієнт кореляції r параметра dP/dt із потоком сонячного випромінювання $F_{10.7}$ протягом заданого часового інтервалу.

Як видно із рис. 1 та 2, а також із табл. 2, наявні дані є гетероскедастичними, тобто параметр dP/dt та потік сонячного випромінювання $F_{10.7}$ мають змінну дисперсію. Це може відобразитись на результатах застосування статистичних методів аналізу даних.

У табл. 2 світло-сірим кольором виділено випадки, коли коефіцієнт кореляції $r > \pm 0.5$, а темно-сірим — $r > \pm 0.7$. Нижчі значення свідчать про слабку кореляцію чи навіть її відсутність — здебільшого у періоди мінімуму сонячної активності. Бачимо, що у період підви-

Таблиця 1. Середні значення параметрів орбіти досліджуваних КО [4, 21]

Номер NORAD	Параметр RCS, м ²	Назва	Нахил орбіти	Ексцентриситет	Кількість обертів за добу	Період орбітального руху, хв	Коментар
2801	1.9572 (1.89)*	COSMOS 158	74.0382	0.0058174	14.36524574	100.24	
4047	0.6582 (0.64)	OPS 1127 (DMSP 4B F3)	98.8254	0.0045703	14.28438944	100.81	
6073	0.7151 (0.72)	COSMOS 482 DESCENT CRAFT	52.0781	0.175093	12.1779405	118.25	Аварійно виведена на орбіту міжпланетна станція «Венера»
15354	6.1832 (6.19)	ERBS	57.0121	0.0012585	15.33687914	93.89	
21656	5.2552 (5.07)	SL-14 R/B (РН Циклон-3)	82.5538	0.0012406	13.17042266	109.30	Розпався на орбіті повністю на фрагменти 12.02.2020 р. [19]
21941	12.2144 (11.8)	ARIANE 44L+ R/B	4.0182	0.5300106	5.27612879	272.93	Згорів у верхніх шарах атмосфери 02.10.2020 р.
23560	9.0537 (9.32)	ERS 2	98.5403	0.0002957	15.14110633	95.11	Наукову місію завершено 05.09.2011 р.
23657	8.0987 (8.29)	SICH 1	82.5299	0.0022209	14.84944361	96.97	
23659	4.5638 (4.39)	SL-14 R/B (РН Циклон-3)	82.5287	0.0024983	14.78047284	97.50	
25860	20.2942 (19.2)	OKEAN O	98.0856	0.0001165	14.75909809	97.70	
25861	13.8465 (13.3)	SL-16 R/B (РН Зеніт-2)	97.9990	0.0015622	14.78131877	97.50	
27386	26.0000 (19.1)	ENVISAT	98.2252	0.0012367	14.37871718	100.06	Наукову місію завершено 05.09.2011 р.
28811	6.9730 (6.77)	SL-24 R/B (РН Дніпро)	97.7534	0.0411607	13.9982261	102.87	
28812	1.1956 (1.24)	SL-24 DEB	98.1488	0.0011398	14.98064164	96.12	

Закінчення табл.1

Номер NORAD	Параметр RCS, м ²	Назва	Нахил орбіти	Ексцентриситет	Кількість обертів за добу	Період орбітального руху, хв	Коментар
28813	8.9369 (9.67)	SL-24 DEB	98.0306	0.0015437	15.07945074	95.49	
31117	0.9673 (1.00)	EGYPTSAT 1	97.7579	0.0007052	14.72107011	97.82	Перейшов у неконтрольований режим руху 17.07.2010 р. [2]
32261	2.2476 (2.35)	DELTA 2 R/B(2) (PAM-D)	39.7898	0.4108802	7.3740831	195.28	Згорів у верхніх шарах атмосфери 15.12.2020 р.
37794	1.0329 (1.01)	SICH 2	98.0723	0.0011617	14.61663415	98.43	Перейшов у неконтрольований режим руху 11.12.2012 р. [6]
38015	10.6870 (9.49)	CZ-3B R/B	23.5980	0.6983954	2.71425319	530.53	Був джерелом малих фрагментів космічного сміття. Згорів у верхніх шарах атмосфери 12.12.2020 р.
40042	(0.08) (1U)**	POLYTAN 1	97.9491	0.0014514	14.86765532	96.85	
42732	(~0.16) (2U)**	POLYTAN 2 SAU	51.6360	0.0004588	15.66030668	91.95	Виведено на орбіту із борту МКС. Згорів у верхніх шарах атмосфери 05.02.2019 р.

* У дужках наведено значення RCS за даними Mike McCants' Satellite Tracking Web Pages.

** 1U — стандарт КубСат (кубічні супутники із розміром ребра 10 см), 2U — супутник у форм-факторі двох КубСатів 1U.

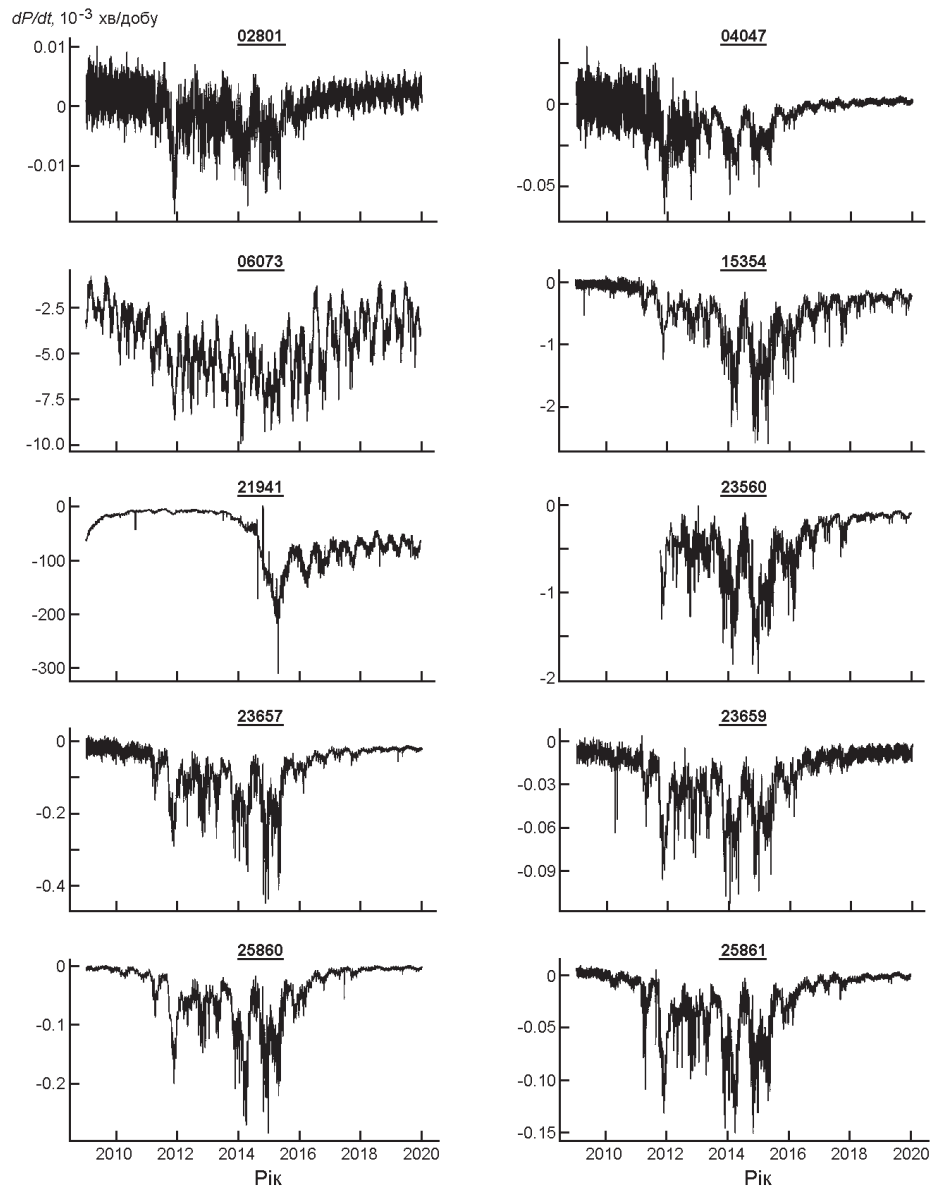


Рис. 2. Темп гальмування dP/dt для вибраних супутників (подано за порядковими номерами NORAD). Закінчення див. с. 69

щеної сонячної активності (2011—2015 рр.), порівняно із мінімумом (2009 р. та 2019 р.), темп гальмування зазвичай зростає у 10 разів для усіх супутників. Переважно це пов'язано зі збільшенням щільності атмосфери [14, 15], оскільки циклічні зміни сонячного випромінювання, а головню EUV (жорсткий ультрафіолет), а також циклічне підвищення геомагнітної активності є причиною варіацій щільності нейтральної термосфери на більш ніж порядок величини [20]. Також є цікавий факт, що для всіх супутників виділяється 2012 рік із низьким рівнем кореляції порівняно із сусідніми 2011 та 2013 роками. Ймо-

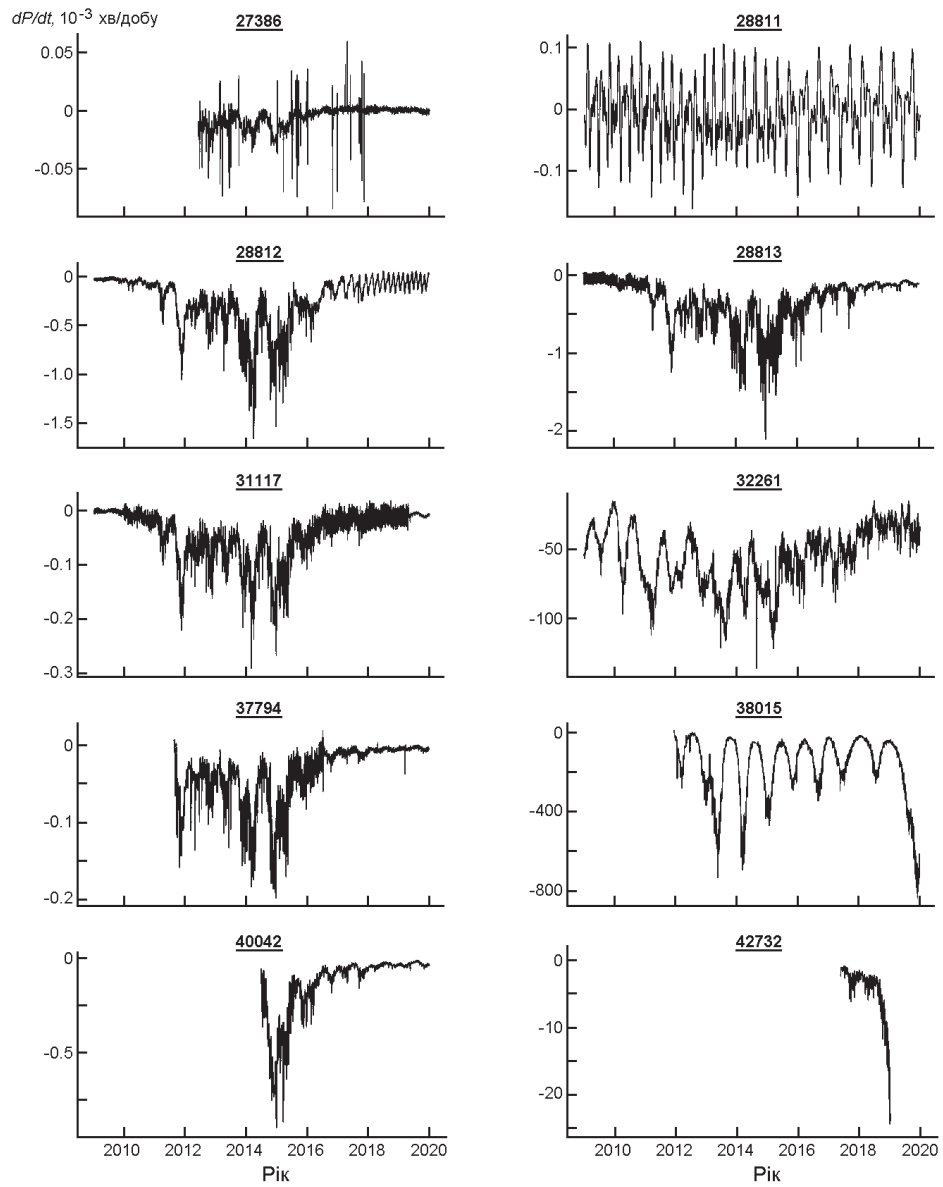


Рис. 2. Закінчення

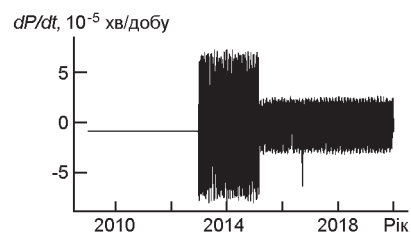


Рис. 3. Темп гальмування dP/dt для КО 21656

Таблиця 2. Річні статистичні характеристики потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ і темпу гальмування dP/dt вибраних супутників протягом 24-го циклу сонячної активності

Об'єкт	Параметр	За весь цикл	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$F_{10.7}$	Середнє	–	70.61	80.09	113.45	119.92	122.85	145.80	117.47	88.74	77.14	69.96	69.72
	r	1	3.32	5.84	24.95	17.72	20.46	27.90	18.97	11.59	9.40	2.52	2.88
02801	Середнє	–	2.17e-06	1.52e-06	-1.80e-06	-1.92e-06	-2.24e-06	-4.88e-06	-2.48e-06	7.17e-07	1.64e-06	2.05e-06	2.30e-06
	r	-0.6775	2.84e-06	2.69e-06	5.12e-06	3.36e-06	3.65e-06	4.40e-06	3.22e-06	1.88e-06	1.56e-06	1.60e-06	1.58e-06
04047	Середнє	–	2.14e-06	-3.88e-07	-1.40e-05	-1.69e-05	-1.35e-05	-2.07e-05	-1.30e-05	-3.03e-06	-1.38e-07	1.04e-06	1.60e-06
	r	-0.7616	1.03e-05	9.69e-06	1.66e-05	1.06e-05	7.91e-06	1.13e-05	8.16e-06	2.93e-06	1.61e-06	1.27e-06	1.32e-06
06073	Середнє	–	-0.00228	-0.00337	-0.00487	-0.00525	-0.00566	-0.00630	-0.00589	-0.00473	-0.00383	-0.00323	-0.00290
	r	-0.7159	0.000740	0.000712	0.00143	0.00102	0.00116	0.00137	0.00143	0.00163	0.00118	0.00100	0.000890
15354	Середнє	–	-2.86e-05	-6.98e-05	-0.000333	-0.000479	-0.000615	-0.00115	-0.00102	-0.000563	-0.000380	-0.000265	-0.000246
	r	-0.7480	7.14e-05	8.38e-05	0.000285	0.000172	0.000282	0.000529	0.000410	0.000219	0.000153	7.72e-05	7.57e-05
21656	Середнє	–	-8.47e-06	-8.47e-06	-8.47e-06	-8.92e-06	-6.70e-06	-3.03e-06	-2.89e-06	-1.26e-06	-1.22e-06	-8.21e-07	-4.84e-07
	r	-0.0220	1.06e-11	1.54e-11	1.84e-11	6.27e-06	5.05e-05	5.16e-05	2.60e-05	1.78e-05	1.72e-05	1.75e-05	1.70e-05
21941	Середнє	–	-0.0272	-0.0107	-0.00816	-0.00766	-0.0128	-0.0595	-0.129	-0.0989	-0.0778	-0.0683	-0.0700
	r	+0.0357	0.0131	0.00494	0.00273	0.00161	0.00534	0.0360	0.0418	0.0181	0.0133	0.0109	0.0107
23560	Середнє	–	-	-	-0.000804	-0.000478	-0.000558	-0.000876	-0.000759	-0.000418	-0.000213	-0.000126	-0.000113
	r	-0.7727	-	-	0.000229	0.000199	0.000236	0.000431	0.000307	0.000202	8.34e-05	2.58e-05	3.01e-05
			-	-	-	-0.0274	-0.6722	-0.5246	-0.5380	-0.5735	-0.3832	-0.0344	-0.4826

Продовження табл.2

Об'єкт	Параметр	За весь цикл	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
23657	Середнє	–	–1.68e-05	–3.05e-05	–9.78e-05	–0.000113	–0.000116	–0.000173	–0.000127	–5.24e-05	–3.11e-05	–2.25e-05	–1.97e-05
	r	–0.8474	–0.0509	–0.1727	–0.8243	–0.3016	–0.7214	–0.6394	–0.6705	–0.6335	8.83e-06	3.80e-06	4.34e-06
23659	Середнє	–	–7.78e-06	–1.22e-05	–3.31e-05	–3.71e-05	–3.79e-05	–5.07e-05	–3.78e-05	–1.71e-05	–1.08e-05	–8.65e-06	–7.81e-06
	r	–0.8433	–0.1474	–0.0276	–0.7817	–0.1182	–0.7407	–0.6544	–0.6255	–0.4977	4.22e-06	3.66e-06	3.58e-06
25860	Середнє	–	–3.54e-06	–1.03e-05	–5.47e-05	–6.61e-05	–6.83e-05	–0.000119	–8.37e-05	–2.64e-05	–8.46e-06	–3.67e-06	–3.02e-06
	r	–0.8589	–0.4382	–0.3175	–0.7713	–0.0338	–0.7770	–0.6415	–0.6881	–0.6697	4.95e-06	1.93e-06	2.02e-06
25861	Середнє	–	–1.36e-06	–4.58e-06	–3.46e-05	–4.23e-05	–4.38e-05	–6.51e-05	–4.40e-05	–1.38e-05	–6.21e-06	–3.10e-06	–1.34e-06
	r	–0.8577	–0.2958	–0.2759	–0.7837	–0.0283	–0.7748	–0.6507	–0.6874	–0.6531	4.34e-06	1.94e-06	1.80e-06
27386	Середнє	–	–	–	–	–1.62e-05	–9.97e-06	–1.32e-05	–9.40e-06	–1.54e-06	6.82e-07	1.02e-06	2.00e-07
	r	–0.5741	–	–	–	1.04e-05	1.03e-05	8.81e-06	1.07e-05	7.67e-06	9.44e-06	1.64e-06	1.59e-06
28811	Середнє	–	–	–	–	–	–0.2089	–0.4306	–0.2032	–0.0164	+0.0602	+0.0221	–0.0383
	r	–0.1258	+0.1056	+0.0947	–0.0312	+0.0181	–0.0236	–0.1670	–0.1131	+0.1092	3.79e-06	4.30e-06	3.54e-06
28812	Середнє	–	–3.27e-05	–6.85e-05	–0.000279	–0.000350	–0.000427	–0.000676	–0.000465	–0.000217	–9.20e-05	–6.70e-05	–5.38e-05
	r	–0.8431	–0.5266	–0.2851	–0.7890	–0.0945	–0.7772	–0.6569	–0.7028	–0.5343	4.77e-05	5.00e-05	5.07e-05
28813	Середнє	–	–4.49e-05	–0.000104	–0.000378	–0.000445	–0.000498	–0.000782	–0.000640	–0.000313	–0.000199	–0.000131	–0.000111
	r	–0.8293	–0.1475	–0.2699	–0.7448	–0.1167	–0.7767	–0.6528	–0.6866	–0.5398	8.30e-05	3.07e-05	2.80e-05
											–0.3962	–0.0162	–0.6308

Закінчення табл. 2

Об'єкт	Параметр	За весь цикл	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
31117	Середнє	–	–1.60e-06	–1.26e-05	–6.17e-05	–7.15e-05	–7.64e-05	–0.000108	–8.09e-05	–3.11e-05	–1.75e-05	–1.21e-05	–9.06e-06
	<i>r</i>	–0.8313	2.99e-06	1.03e-05	5.15e-05	2.76e-05	3.56e-05	5.58e-05	4.15e-05	1.75e-05	1.31e-05	1.22e-05	7.31e-06
32261	Середнє	–	–0.3423	–0.1751	–0.7797	–0.2367	–0.7003	–0.5346	–0.5868	–0.4274	–0.1131	–0.0630	–0.2583
	<i>r</i>	–0.6148	–0.0375	–0.0480	–0.0686	–0.0594	–0.0793	–0.0706	–0.0701	–0.0511	–0.0516	–0.0322	–0.0328
		–	0.0110	0.0191	0.0172	0.0148	0.0161	0.0149	0.0203	0.0103	0.0104	0.00681	0.00825
37794	Середнє	–	+0.6148	–0.0965	–0.1755	+0.0825	+0.2583	–0.3663	–0.4868	–0.3416	–0.1449	+0.0356	–0.1683
	<i>r</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
38015	Середнє	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	<i>r</i>	–0.7906	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
40042	Середнє	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	<i>r</i>	–0.8318	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
42732	Середнє	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	<i>r</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

вірно, це пов'язано із різким підвищенням сонячної активності, а потім його зменшенням у цей період (рис. 1).

Відразу слід зауважити, що високі значення коефіцієнта кореляції не обов'язково свідчать про причинно-наслідковий зв'язок двох часових рядів. Окрім того, високі значення кореляції не завжди є фізично обґрунтованими. Наприклад, для ряду супутників коефіцієнт кореляції за весь цикл набуває значень близько -0.8 , але перевірка даних на менших часових інтервалах (по роках) показує, що кореляційна залежність є набагато складнішою та змінною з часом. А для пекулярного КО 21656 у деякі періоди кореляція становить $+0.6$ (не антикореляція, як для решти КО) — що також свідчить про недостатню достовірність результатів застосування лише самого кореляційного аналізу.

ПОГЛИБЛЕНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ ОКРЕМИХ ДАНИХ

Дослідження на періодичність. Для продовження аналізу потрібно дослідити дані часові ряди на наявність сезонних складових (з періодом 1 рік, пів року, квартал) чи циклічних складових з періодом або більше року, або менше 1 місяця.

У роботі [14] при аналізі орбітальних даних штучних супутників Землі за період жовтень 2003 р. — грудень 2004 р. були відмічені періодичні зміни протягом 27...28 діб. Окрім того, як було згадано вище, зміни щільності нейтральної термосфери мають кумулятивний вплив на гальмування орбітального руху КО на низьких орбітах. У роботах [20, 23] виділено варіації щільності, спричинені сонячною активністю на різних часових масштабах, а саме:

- *різкі зміни* (тривалістю від декількох хвилин до кількох годин), які є результатом впливу сонячного спалаху та геомагнітної бурі (що може бути пов'язане із корональним викидом маси або спалахом). Наприклад, спалах балу X17 може спричинити зростання щільності на 30...40 % на денній стороні. А сильна геомагнітна буря (з геомагнітним індексом $Kp = 9$) може привести до збільшення щільності у 2...3 рази.
- *добові варіації*, які є результатом як зміни освітлення сонячним випромінюванням атмосфери внаслідок обертання Землі (день — ніч), так і припливними ефектами. Амплітуда цих варіацій щільності близька до 100 %.
- *кількаденні зміни*, спричинені в основному геомагнітною активністю внаслідок дії сонячного вітру. Амплітуда таких змін не перевищує 50 %.
- *варіації*, пов'язані із обертанням Сонця (приблизно 27 діб), які є результатом появи активних областей на видимому диску Сонця при його власному обертанні (синодичний період — 27.3 доби). Значення щільності нейтральної атмосфери може змінюватись приблизно удвічі у період високої сонячної активності.

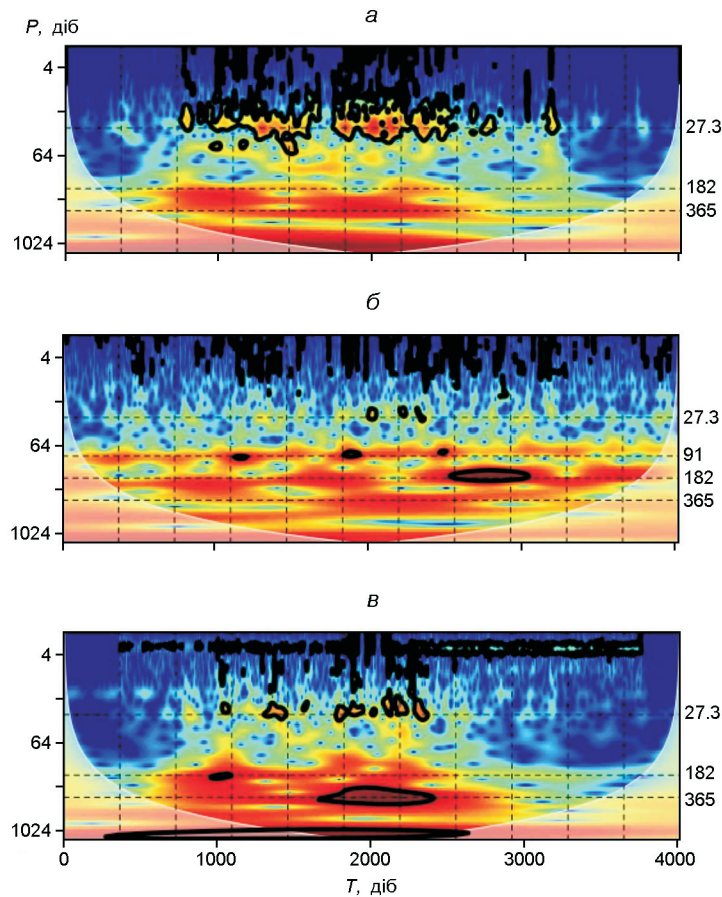


Рис. 4. Вейвлет-розклад вибраних даних: потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ (а), темпу гальмування dP/dt для КО 06073 (б), темпу гальмування dP/dt для КО 31117 (в). Нуль шкали часу ($T = 0$) відповідає 01 січня 2009 р.

- *річні/піврічні* (сезонні) зміни щільності, які є наслідком орбітального руху Землі, піврічних варіацій геомагнітної активності та великомасштабної циркуляції в атмосфері між північною та південною півкулями. Річні варіації щільності між мінімумом (приблизно у липні) та максимумом (в епохи рівнодень) становлять приблизно 100 %, але зі значною зміною на менших часових масштабах від 30 % до 250 %.
- *зміни щільності*, пов'язані із циклічністю сонячної активності (приблизно 11 років), які є результатом циклічності магнітної активності Сонця. Амплітуда варіацій щільності нейтральної термосфери внаслідок циклічності сонячної активності сягає одного порядку (тобто у межах 10 разів).

Для перевірки наявності згаданих періодичностей було використано вейвлет-аналіз, який також активно застосовується для аналізу результатів астрономічних спостережень [10]. Як пробні було взято:

дані про сонячне радіовипромінювання $F_{10.7}$; дані для КО 06073 (об'єкт із другої групи із вираженою періодичністю — див. рис. 2); дані для КО 31117 (із першої групи — супутник типу «Січ-2-1»). Вейвлет-розклад вибраних даних представлено на рис. 4.

З аналізу вейвлет-розкладів (рис. 4) можна зробити такі висновки:

— для сонячних даних яскраво видно сезонні зміни із періодами рік та пів року, а також циклічність із періодом 27 діб;

— для КО 06073 — виділяються сезонні зміни із періодами 1 рік, 0.5 року та 0.25 року, а також слабша циклічність із періодом 27 діб;

— для КО 31117 — виділяються сезонні зміни із періодами рік та пів року (0.25 року, на відміну від КО 06073, не виділяється), також циклічність із періодом 27 діб та значно слабша — із періодом 14 діб.

Звичайно, для уточнення наведених результатів було б доцільно проаналізувати дані протягом 2-3 циклів сонячної активності, проте таке дослідження виходить за рамки даної публікації.

Аналіз STL-розкладів. Як було відзначено раніше та видно із рис. 1...4, для подальшого дослідження часові ряди можна розкласти на декілька складових, які будуть відображати різний характер залежності від часу [12]. Універсальним та надійним методом такої декомпозиції є виділення тренду і сезонної складової з використанням методу непараметричної регресії для оцінки нелінійних зв'язків (Seasonal and Trend decomposition using Loess — STL) [9, 12]:

— STL дає можливість виділити довільний тип сезонних змін, а не лише місячну чи квартальну, як більшість класичних методів;

— сезонна складова може змінюватись з часом, її зміна контролюється користувачем;

— тренд — еволюційний компонент — також може контролюватись користувачем;

— розклад є надійним щодо впливу викидів, тобто поодинокі нехарактерні спостереження не вплинуть на оцінку тренду та сезонного компонента. Водночас вони, звісно, будуть наявні у залишках.

Отже, далі ми використали STL-метод для розрахунку пробних адитивних моделей часових залежностей досліджуваних параметрів [10]. Слід зазначити, що раніше цей метод до вибраних параметрів не застосовувався. Проте, як вже було показано вище, у цих даних наявні сезонні компоненти, а тому цілком допустимо застосовувати STL для нашого дослідження.

Розглянувши різні параметри декомпозиції [9, 10], з врахуванням літературних даних [5, 14, 16, 20, 23], ми отримали такий розклад для рядів значень $F_{10.7}$ потоку радіовипромінювання Сонця (рис. 5).

Однією із умов валідації моделі [10], тобто задовільного розкладу на компоненти, є те, що лишки не мають містити періодичної складової та повинні бути нормально розподілені [12]. На рис. 6 приведено аналіз лишків після STL-декомпозиції даних для потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$. Як видно, розподіл отриманих лишків має надлишок «хвостових» значень, хоча все ж таки є близьким до гаус-

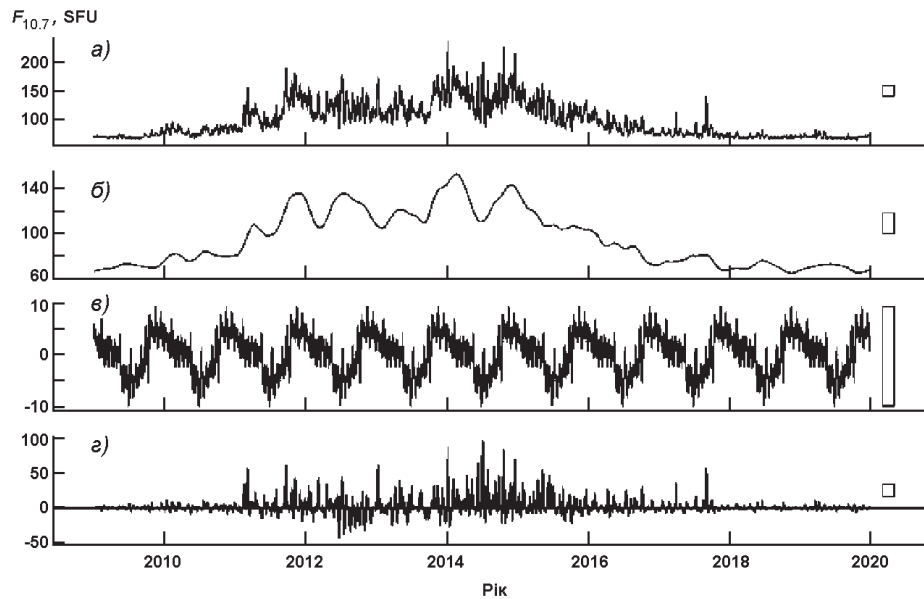


Рис. 5. Декомпозиція рядів значень потоку $F_{10.7}$ радіовипромінювання Сонця: *a* — вихідний ряд, *б* — тренд, *в* — сезонний компонент, *г* — лишки

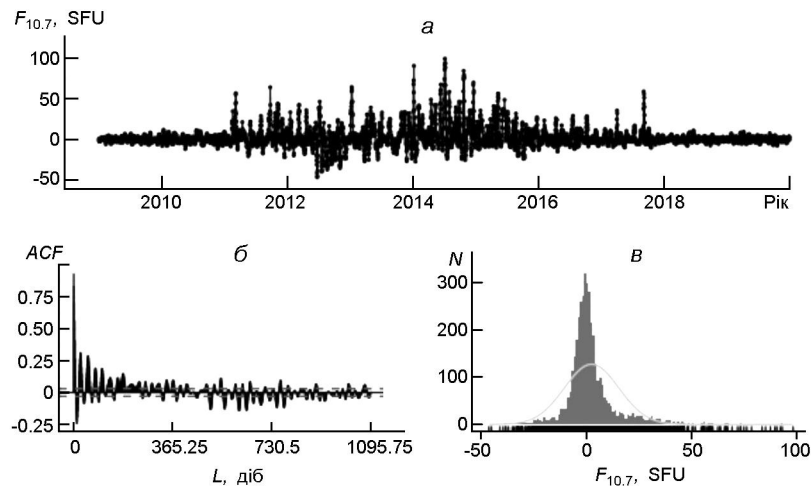


Рис. 6. Аналіз лишків після STL-декомпозиції потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$: лишки (*a*), автокореляційна функція ACF (*б*), гістограма розподілу лишків (*в*)

сівського, і в даних немає значних піків залишкової періодичної складової. Як було згадано раніше, такий розподіл лишків може бути результатом гетероскедастичності самих даних. Тим не менше, розклад на рис. 5 у першому наближенні можна вважати достатньо адекватним.

Подібні декомпозиції проведено також для КО 31117 та КО 37794 на рис. 7 і 9, а відповідні лишки від розкладів проаналізовано на рис. 8 та 10.

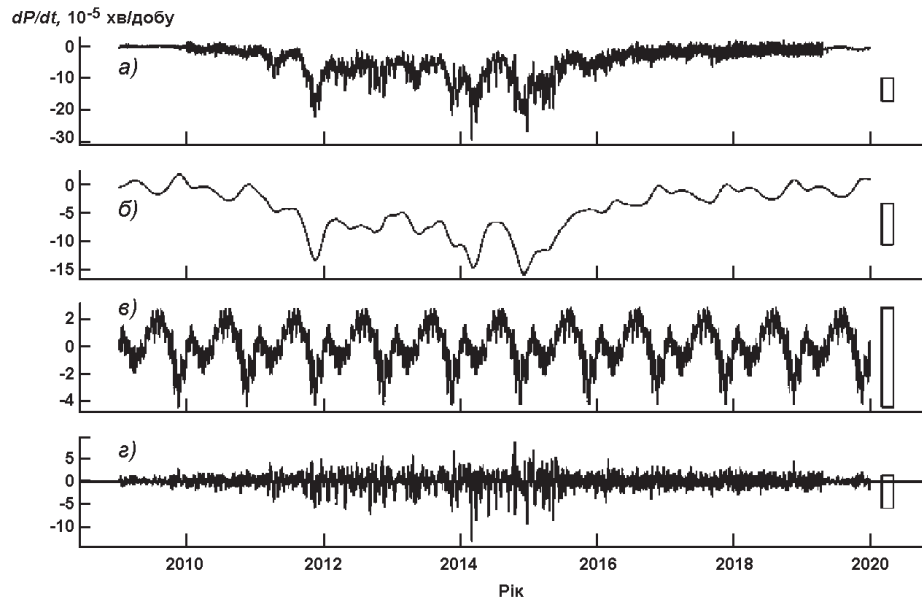


Рис. 7. Декомпозиція даних щодо темпу гальмування dP/dt для КО 31117

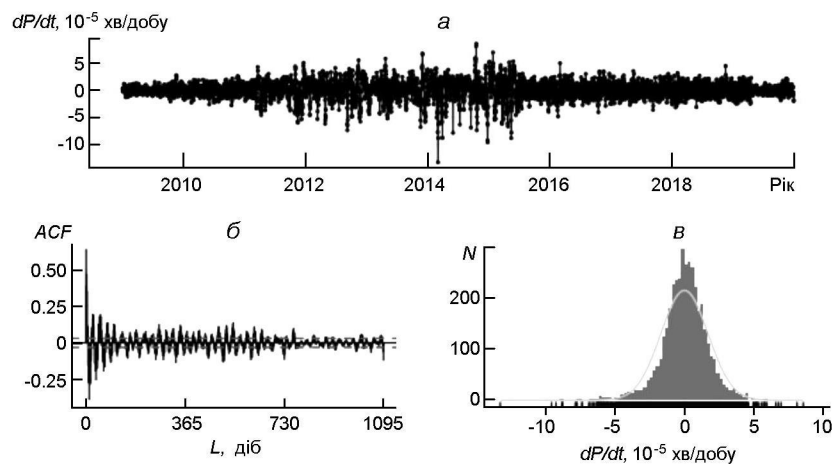


Рис. 8. Аналіз лишків після STL декомпозиції темпу гальмування dP/dt для КО 31117: лишки (а), автокореляційна функція ACF (б), гістограма (в) розподілу лишків (знизу праворуч)

Видно, що розподіл отриманих лишків (рис. 8, 10) є ближчим до гауссівського порівняно із результатом декомпозиції для сонячних даних. Проте у лишках може бути наявна невиділена складова тренду. Тим не менше, наш розклад (див. рис. 7, 9) у першому наближенні можна вважати достатньо адекватною пробною моделлю.

Обговорення отриманих результатів. Результати крос-кореляції трендів (еволюційних компонентів) відповідних декомпозицій темпу гальмування dP/dt для КО 31117 та КО 37794 (які є аналогом су-

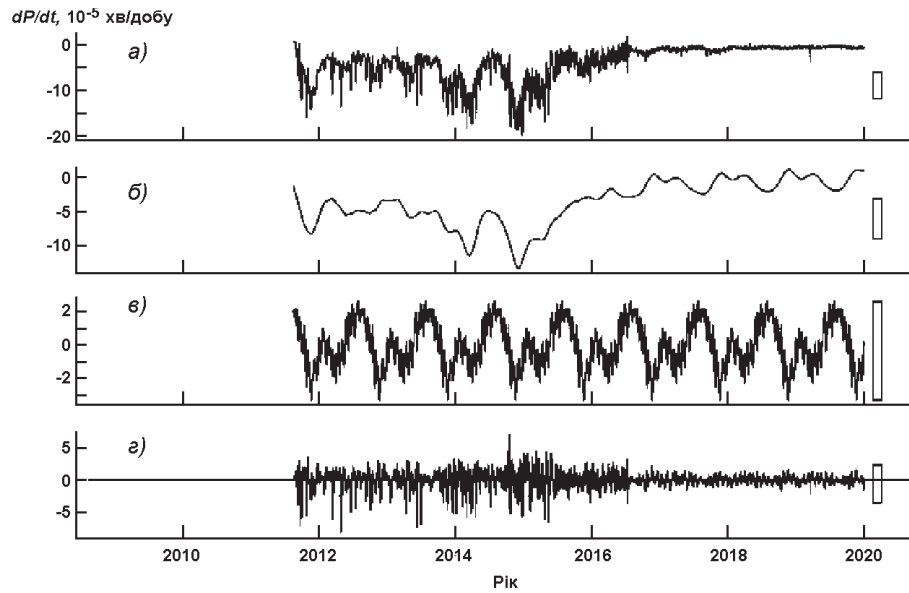


Рис. 9. Декомпозиція даних щодо темпу гальмування dP/dt для КО 37794

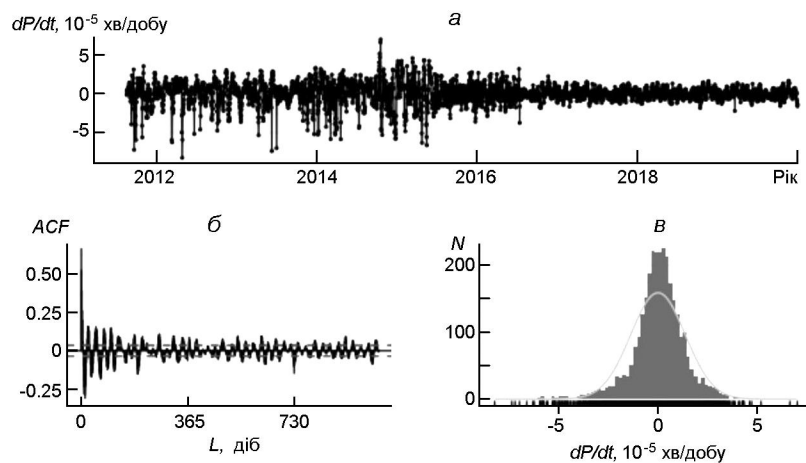


Рис. 10. Аналіз лишків після STL декомпозиції темпу гальмування dP/dt для КО 37794: лишки (зверху), автокореляційна функція ACF (знизу ліворуч), гістограма (count) розподілу лишків (знизу праворуч)

путника «Січ-2-1») та потоку сонячного радіовипромінювання $F_{10.7}$ приведено у табл. 3. Тут, аналогічно до табл. 2, високі значення коефіцієнта кореляції виділено відповідним відтінком сірого.

Тренди (еволюційні компоненти) відповідних декомпозицій темпу гальмування dP/dt для КО 31117 і КО 37794, а також для радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ приведено на рис. 11.

З рис. 11 бачимо, що у період збільшення і максимальних значень потоку сонячного радіовипромінювання $F_{10.7}$ відбувається збільшення темпу гальмування КО 31117 та КО 37794, а у період зменшення

Таблиця 3. Кофіцієнти крос-кореляції трендів декомпозицій темпу гальмування dP/dt для КО 31117 та КО 37794 з відповідним трендом для потоку сонячного радіовипромінювання $F_{10.7}$

КО	За весь цикл	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
31117	-0.9467	-0.3378	-0.5631	-0.9688	-0.7263	-0.9370	-0.8710	-0.8818	-0.9516	-0.9330	-0.9058	-0.6808
37794	-0.9131	–	–	–	-0.8992	-0.9490	-0.8195	-0.8787	-0.8739	-0.9126	-0.8513	-0.5521

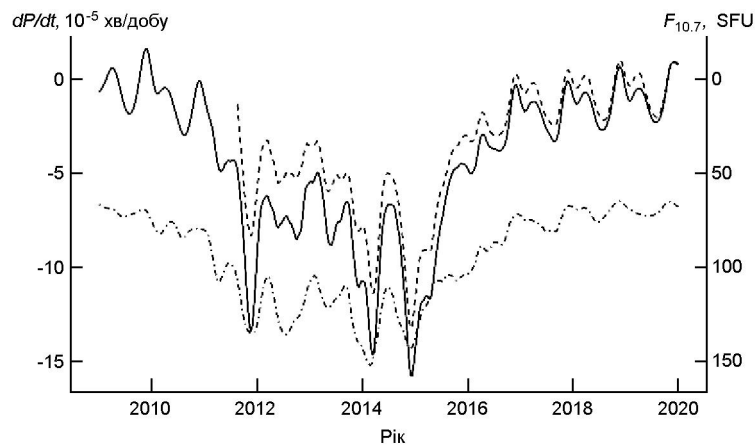


Рис. 11. Тренди темпу гальмування dP/dt для КО 31117 (суцільна лінія) і для КО 37794 (штрихова крива) відповідно до лівої шкали; потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ (штрих-пунктир, шкала справа)

потоку радіовипромінювання їхнє гальмування сповільнюється. Максимальна антикореляція між трендами відповідних параметрів спостерігається (див. табл. 3): у межах $-0.73...-0.95$ для КО 31117 у період 2011—2018 рр.; у межах $-0.82...-0.95$ для КО 37794 у період 2012—2018 рр.

Отримані результати аналізу ширше розкривають зв'язки між сонячною активністю та змінами орбітального руху ШСЗ, показані нами раніше в роботах [15, 16], що підтверджує доцільність застосованих методів. Отже, є потреба у фізичному обґрунтуванні, яке буде предметом розгляду у наступних наших роботах. Також потрібно розширити часові періоди та детальніше опрацювати дані для інших КО, дослідити кореляцію цих даних з іншими параметрами, наприклад геомагнітними індексами A_p , K_p , K_p [3, 17]. Потрібно також взяти до уваги вплив сонячного вітру. Адже комплекс Сонце – сонячний вітер – геомагнітосфера є складною нелінійною динамічною системою, в якій взаємодіють процеси із різними часовими та просторовими масштабами, і яка практично весь час перебуває у нерівноважному стані [3].

ВИСНОВКИ

Ми провели початковий аналіз рядів значень сонячного радіовипромінювання на довжині хвилі $\lambda = 10.7$ см протягом цілого 24-го циклу сонячної активності та орбітального руху низькоорбітальних штучних супутників Землі в цей період.

В результаті застосування аналізу річних статистичних характеристик для кінематичного параметру dP/dt орбітального руху 21 супутника та порівняння їх із характеристиками для потоку сонячного радіовипромінювання $F_{10.7}$ було показано, що здебільшого у період максимуму сонячної активності (2012—2014 рр.), порівняно із мінімумом (2009 р. та 2019 р.), темп гальмування космічних об'єктів збільшується у 10 разів; для всіх супутників виділяється 2012 рік із низьким рівнем кореляції; перевірка даних на менших часових інтервалах (по роках) показала, що кореляційна залежність є набагато складнішою та змінною з часом.

Методом вейвлет-аналізу було виявлено яскраво виражені сезонні зміни радіовипромінювання Сонця із періодами рік та пів року, а також циклічність із періодом 27 діб; для КО 06073 — виражені сезонні зміни із періодами 1 рік, 0.5 року та 0.25 року, а також слабшу циклічність із періодом 27 діб; для КО 31117 — виражені сезонні зміни із періодами рік та пів року і циклічність із періодом 27 діб та значно слабшу — із періодом 14 діб.

Метод STL-декомпозиції показав чітку антикореляцію між трендами відповідних параметрів у межах $-0.73...-0.95$ для КО 31117 у період 2011—2018 рр., у межах $-0.82...-0.95$ для КО 37794 у період 2012—2018 рр.

Отримані результати стосовно КО 31117 і КО 37794 можуть бути цікавими для ДКАУ, як оператора майбутнього супутника «Січ-2-1».

Слід зазначити, що в цій роботі ми не робили спроб фізичної інтерпретації отриманих результатів (якщо тільки це не було потрібно для пояснення вибору методу аналізу). Фізичне обґрунтування може бути предметом розгляду у продовженні такого дослідження. Також було б доцільно розширити часові періоди та детальніше опрацювати дані для інших КО, дослідити їхню кореляцію з іншими параметрами геліо- та геоактивності. Щоправда, у відкритому доступі необхідні дані для КО є лише на масштабі порядку однієї доби. А тому за цими даними можна досліджувати часові варіації на інтервалах не менше 1 тижня.

Автори щиро вдячні старшому науковому співробітнику Астрономічної обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка С. Апуневичу за участь в обговоренні та цінні рекомендації щодо методів аналізу часових рядів.

1. Державне космічне агентство України. URL: <https://www.nkau.gov.ua> (Останнє звернення 07.05.2021).
2. Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И., Мотрунич И. И., Найбауэр И. Ф., Кошкин Н. И., Билинский А. И., Мартынюк-Лотоцкий К. П., Благодыр Я. Т., Лопаченко

- В. В., Рыхальский В. В., Рыщенко С. В., Жуковецкий А. В. Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства. *Космічна наука і технологія*. 2012. 18. № 1. С. 60—67. DOI: 10.15407/knit2012.01.060
3. Парновский А. С., Ермолаев Ю. И., Жук И. Т. Космическая погода: история исследования и прогнозирование. *Космічна наука і технологія*. 2010. 16. № 1. С. 90—99. DOI: 10.15407/knit2010.01.090
4. УМОС — Українська мережа оптичних станцій для дослідження навколоземного космічного простору: Каталог. URL: <http://mao.uran.ua/umos/index.php?slab=slabid-12> (Last accessed 05.06.2021).
5. Шакун Л. С., Кошкин Н. И. Кластерный анализ базы данных параметров орбит ИСЗ. *Odessa Astron. Publs.* 2011. 24. С. 147—152.
6. Шульга О. В., Кравчук С. Г., Сибірякова Є. С., Білінський А. І., Благодир Я. Т., Вовчик Є. Б., Єпішев В. П., Кара І. В., Козирев Є. С., Кошкін М. І., Кудак В. І., Куліченко М. О., Любич І. В., Мажаєв О. Е., Мартинюк-Лотоцький К., Романюк Я. О., Терпан С. С., Шакун Л. С. Розвиток української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколоземного космічного простору. *Космічна наука і технологія*. 2015. 21. № 3. С. 74—82. DOI: 10.15407/knit2015.03.074
7. *Archive of the Daily Solar Data*, prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center. URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (Last accessed: 01.03.2021).
8. Cannon P., Angling M., Barclay L., Curry Ch., Dyer C., Edwards R., Greene G., Hapgood M., Horne R. B., Jackson D., Mitchell C. N., Owen J., Richards A., Rodgers Ch., Ryden K., Saunders S., Sweeting M., Tanner R., Thomson A., Underwood C. *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. London: Royal Academy of Engineering, 2013. 24 p. URL: <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/space-weather-full-report>
9. Cleveland R. B., Cleveland W. S., McRae J. E., Terpenning I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *J. Official Statistics*. 1990. 6. № 1. P. 3—73.
10. Feigelson E. D., Babu G. J. *Modern statistical methods for astronomy: with R Applications*. Date Published: July 2012 (Cambridge University Press), ISBN: 9780521767279. 490 p.
11. Feynman J., Gabriel S. B. On space weather consequences and predictions. *J. Geophys. Res.* 2000. 105(A5). P. 10543—10564. DOI: 10.1029/1999JA000141
12. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice, 3rd edition* (2021) Melbourne: OTexts. URL: <https://OTexts.com/fpp3> (Last accessed: 23.04.2021).
13. Iucci N., Levitin A. E., Belov A. V., Eroshenko E. A., Ptitsyna N. G., Villaresi G., Chizhenkov G. V., Dorman L. I., Gromova L. I., Parisi M., Tyasto M. I., Yanke V. G. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005. 3. S01001. DOI: 10.1029/2003SW000056.
14. Koshkin N., Korniychuk L., Korobeynikova E., Ryabov M., Sukhov K. The Features of Change of the Drag Perturbations of Artificial Satellite Orbits during Extreme Developments of Solar Activity in Years 2003-2004. *Sun and Geosphere*. 2006. 1(2). P. 46—49.
15. Koval'chuk M. M., Hirnyak M. B., Baran O. A., Stodilka M. I., Vovchyk Ye. B., Bilinsky A. I., Blahodyr Ya. T., Virun N.V., Apunevych S. V. Investigation of Heliogeoactivity Impact on the Dynamics of Orbital Parameters of Earth's Artificial Satellites. I. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 2017. 33. № 5. P. 245—249. DOI:

10.3103/S0884591317050038

16. Koval'chuk M. M., Baran O. A., Stodilka M. I., Vovchuk Ye. B., Bilinsky A. I., Blahodyr Ya. T., Virun N. V. Orbital Data of the Artificial Satellites of the Earth. *17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology": Book of Abstracts. August 13—20, 2017. Odessa, Ukraine.* P. 33.
17. Lathuillière C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's Atmosphere to the Earth's Atmosphere: an Overview of Scientific Models Available for Space Weather Developments. *Ann. Geophys. European Geosciences Union.* 2002. 20 (7). P. 1081—1104.
18. Lockwood M., Bentley S., Owens M. J., Barnard L. A., Scott C. J., Watt C. E., Allanson O. The development of a space climatology: 3. Models of the evolution of distributions of space weather variables with timescale. *Space Weather.* 2018. 16. P. 180—209. DOI: 10.1029/2018SW002017
19. *Orbital Debris Quarterly News by National Aeronautics and Space Administration*, Volume 24, Issue 2 (April 2020). URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/> (Last accessed: 23.04.2021).
20. Qian L., Solomon S. C. Thermospheric density: An overview of temporal and spatial variations. *Space Sci. Revs.* 2012. 168. P. 147—173. DOI: 10.1007/s11214-011-9810-z
21. *Satellites' Orbital Data (in TLE) by USSPACECOM.* URL: <https://www.space-track.org> (Last accessed: 01.03.2021).
22. Vallado D. A., Crawford P., Kelso T. S. *Revisiting Spacetrack Report #3.* AIAA 2006-6753 (presented at the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO, 2006 August 21—24). URL: <http://www.celestrak.com/publications/> (Last accessed: 30.04.2021).
23. Weng L., Lei J., Doornbos E., Fang H., Dou X. Seasonal variations of thermospheric mass density at dawn/dusk from GOCE observations. *Ann. Geophys.* 2018. 36. P. 489—496. DOI: 10.5194/angeo-36-489-2018

REFERENCES

1. *State Space Agency of Ukraine.* (2021) URL: <https://www.nkau.gov.ua> (Last accessed 07.05.2021).
2. Epishev V. P., Isak I. I., Kudak V. I., Motrunich I. I., Noibauer I. F., Koshkin N. I., Belinskii A. I., Martyniuk-Lototskij K. P., Blagodyr Ya. T., Lopachenko V. V., Rykhalskij V. V., Ryschenko S. V., Zhukovetskij A. V. (2012) Some results of studies of the behaviour of a satellite in orbit in contingency mode under the near-Earth space influence. *Kosm. nauka tehnol.* 18(1). 60—67. DOI: 10.15407/knit2012.01.060
3. Parnowski A. C., Yermolayev Yu. I., Zhuk I. T. (2010) Space weather: the history of research and forecasting. *Kosm. nauka tehnol.* 16(1). 90—99. DOI: 10.15407/knit2010.01.090
4. UMOS — Ukraine Network of Optical Stations for near-Earth space research: Catalogue. (2021) URL: <http://mao.uran.ua/umos/index.php?slab=slabid-12> (Last accessed 05.06.2021).
5. Shakun L. S., Koshkin N. I. (2011) Cluster analysis of database of orbit parameters of artificial satellites. *Odessa Astron. Publs.* 24. 147—152.
6. Shulga A. V., Kravchuk S. G., Sybiryakova Y. S., Bilinsky A. I., Blagodyr Ya. T., Vov-

- chyk E. B., Epishev V. P., Kara I. V., Kozyryev Y. S., Koshkin N. I., Kudak V. I., Kulichenko N. A., Lubich I. V., Mazhaev A. E., Martynyuk-Lototsky K. P., Romanuk Ya. O., Terpan S. S., Shakun L. S. (2015) Development of Ukrainian network of optical stations UMOS as component of control systems for near-Earth space. *Kosm. nauka tehnol.* 21(3). 74—82. DOI: 10.15407/knit2015.03.074
7. *Archive of the Daily Solar Data* (2021) prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center. URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (Last accessed: 01.03.2021).
 8. Cannon P., Angling M., Barclay L., Curry Ch., Dyer C., Edwards R., Greene G., Hapgood M., Horne R. B., Jackson D., Mitchell C. N., Owen J., Richards A., Rodgers Ch., Ryden K., Saunders S., Sweeting M., Tanner R., Thomson A., Underwood C. (2013) *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. London: Royal Academy of Engineering. URL: <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/space-weather-full-report>
 9. Cleveland R. B., Cleveland W. S., McRae J. E., Terpenning I. (1990) STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. *J. Official Statistics.* 6(1). 3—73.
 10. Feigelson E. D., Babu G. J. (2012) *Modern statistical methods for astronomy: with R applications*. Cambridge University Press, ISBN: 9780521767279.
 11. Feynman J., Gabriel S. B. (2000) On space weather consequences and predictions. *J. Geophys. Res.* 105(A5). 10543—10564. DOI: 10.1029/1999JA000141
 12. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. (2021) *Forecasting: principles and practice, 3rd edition*, Melbourne: OTexts. URL: <https://OTexts.com/fpp3> (Last accessed: 23.04.2021).
 13. Iucci N., Levitin A. E., Belov A. V., Eroshenko E. A., Ptitsyna N. G., Villaresi G., Chizhenkov G. V., Dorman L. I., Gromova L. I., Parisi M., Tyasto M. I., Yanke V. G. (2005) Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather.* 3. S01001. 16. DOI: 10.1029/2003SW000056.
 14. Koshkin N., Korniyuchuk L., Korobeynikova E., Ryabov M., Sukhov K. (2006) The features of change of the drag perturbations of artificial satellite orbits during extreme developments of solar activity in years 2003–2004. *Sun and Geosphere.* 1(2). 46—49.
 15. Koval'chuk M. M., Hirnyak M. B., Baran O. A., Stodilka M. I., Vovchik Ye. B., Bilinsky A. I., Blahodyr Ya. T., Virun N. V., Apunevych S. V. (2017) Investigation of heliogeoaactivity impact on the dynamics of orbital parameters of Earth's artificial satellites. I. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 33(5). 245—249. DOI: 10.3103/S0884591317050038
 16. Koval'chuk M. M., Baran O. A., Stodilka M. I., Vovchik Ye. B., Bilinsky A. I., Blahodyr Ya. T., Virun N. V. (2017) Orbital data of the artificial satellites of the Earth. *17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology": Book of Abstracts. August 13—20, 2017. Odessa, Ukraine.* 33.
 17. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. (2002) From the Sun's Atmosphere to the Earth's Atmosphere: an Overview of Scientific Models Available for Space Weather Developments. *Ann. Geophys., European Geosciences Union.* 20(7). 1081—1104.
 18. Lockwood M., Bentley S., Owens M. J., Barnard L. A., Scott C. J., Watt C. E., Allanson O. (2018) The development of a space climatology: 3. Models of the evolution of distributions of space weather variables with timescale. *Space Weather.* 16. 180—209. DOI: 10.1029/2018SW002017

19. *Orbital Debris Quarterly News by National Aeronautics and Space Administration* (2020) 24, 2. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/> (Last accessed: 23.04.2021).
20. Qian L., Solomon S. C. (2012) Thermospheric density: An overview of temporal and spatial variations. *Space Sci. Revs.* 168. 147—173.
DOI: 10.1007/s11214-011-9810-z
21. *Satellites' Orbital Data (in TLE) by USSPACECOM.* (2021)
URL: <https://www.space-track.org> (Last accessed: 01.03.2021).
22. Vallado D. A., Crawford P., Kelso T. S. (2006) *Revisiting Spacetrack Report #3*. AIAA 2006-6753 (presented at the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO, 2006 August 21–24). URL: <http://www.celstrak.com/publications/> (Last accessed: 30.04.2021).
23. Weng L., Lei J., Doornbos E., Fang H., Dou X. (2018) Seasonal variations of thermospheric mass density at dawn/dusk from GOCE observations. *Ann. Geophys.* 36. 489—496. DOI: 10.5194/angeo-36-489-2018

A. I. Bilinsky, O. A. Baran, M. I. Stodilka, Ye. B. Vovchuk, M. M. Koval'chuk

Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv,
Lviv, Ukraine

STATISTICAL ANALYSIS OF THE ORBITAL MOTION OF SELECTED EARTH'S ARTIFICIAL SATELLITES DURING THE 24TH CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

Statistical analysis of selected parameters of solar activity and orbital motion of artificial satellites of the Earth during the 24th cycle of solar activity was performed. Inactive satellites, rocket bodies and their debris moving mainly in low orbits were selected for the study. Different algorithms of analysis were applied to the time series of solar radiation flux $F_{10.7}$ and the calculated rate of orbital deceleration dP/dt of the studied space objects (SO): estimation of their annual statistical characteristics, study of these parameters for periodicity (wavelet analysis), additive selection of trend and seasonal components. It is obtained that the rate of orbital deceleration of satellites increases 10 times near the maximum of solar activity (2012—2014). For SO 06073 and SO 31117, we confirmed the presence of seasonal changes in solar radiation $F_{10.7}$ and kinematic parameter dP/dt , their cyclicity with a period of 27 days, etc. There is a strong anticorrelation between the trends of the relevant parameters within $-0.73...-0.95$ for SO 31117 in the period 2011—2018, within $-0.82...-0.95$ for SO 37794 in the period 2012—2018.

Keywords: artificial satellites of the Earth, elements of orbits, solar activity, flux of solar radiation, time series, statistical analysis.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2021

Після доопрацювання 23.07.2021

Прийнята до друку 19.08.2021