

УДК 523.942

**М. М. Ковальчук¹, М. Б. Гірняк¹, О. А. Баран¹,
М. І. Стоділка¹, Є. Б. Вовчик¹, А. І. Білінський¹,
Я. Т. Благодир¹, Н. В. Вірун¹, С. В. Апуневич²**

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, 79005
e-mails: kovmar@astro.franko.lviv.ua, hirnyak@astro.franko.lviv.ua, lesiaab@gmail.com,
sun@astro.franko.lviv.ua, evavovchyk@ukr.net, slr1831@ukr.net,
ja.blagod@gmail.com, n.virun@gmail.com

²Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, 79005
e-mail: sofiya.apunevych@gmail.com

Роль параметрів сонячного вітру у зміні поведінки орбітального руху штучних супутників Землі

У роботі продовжено дослідження впливу параметрів сонячного вітру та геомагнітної активності на зміну періодів орбітального руху ШСЗ. Використовувались значення періодів орбітального руху некерованих супутників з бази даних української мережі оптичних станцій (УМОС) за 2012—2014 рр., які зіставлялись зі значеннями геомагнітного планетарного індексу K_p та з енергетичними спектрами протонів і електронів, отриманими супутниками типу GEOS для подій, у межах яких змінювались періоди обертання ШСЗ (усі геліо- і геодані взято з бази даних Центру прогнозування космічної погоди SWPC NOAA). Отримано, що в енергетичних спектрах потоків протонів і електронів відсутній ефект пом'якшення спектру з часом — до моменту появи спалаху. Це вказує на можливість накопичення частинок над активною областю (АО), що спричиняє подальший неперервний відвід енергії з АО — сонячний спалах. Отримано залежності між геомагнітною активністю та швидкістю сонячного вітру при заданій напруженості міжпланетного магнітного поля для досліджуваних часових термінів змін періодів орбітального руху ШСЗ. Значення відповідних коефіцієнтів кореляції становлять 0.93...0.96.

РОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ИЗМЕНЕНИИ ПОВЕДЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ, Ковальчук М. М., Гирняк М. Б., Баран А. А., Стоділка М. И., Вовчик Э. Б., Билинский А. И., Благодыр Я. Т., Вирун Н. В.,

Апуневич С. В. — В работе продолжены исследования влияния параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на изменения периодов орбитального движения ИСЗ. Использовались значения периодов орбитального движения неуправляемых спутников из базы данных украинской сети оптических станций (УМОС) за 2012—2014 гг., которые сопоставлялись со значениями геомагнитного планетарного индекса K_p и энергетическими спектрами протонов и электронов, полученными спутниками типа GEOS для событий, в пределах которых изменялись периоды вращения ИСЗ (все гелио- и геоданные взяты из базы данных Центра прогнозирования космической погоды SWPC NOAA). Получено, что в энергетических спектрах потоков протонов и электронов отсутствует эффект смягчения спектра со временем — к моменту появления вспышки. Это указывает на возможность накопления частиц над активной областью (АО), что влечет за собой дальнейший непрерывный вывод энергии из АО — солнечную вспышку. Получены зависимости между геомагнитной активностью и скоростью солнечного ветра при заданной напряженности межпланетного магнитного поля для исследуемых временных сроков изменений периодов орбитального движения ИСЗ. Значения соответствующих коэффициентов корреляции составляют 0.93...0.96.

ROLE OF THE PARAMETERS OF SOLAR WIND IN THE CHANGING OF ORBITAL MOTION OF THE ARTIFICIAL SATELLITES OF THE EARTH, by Koval'chuk M. M., Hirnyak M. B., Baran O. A., Stodilka M. I., Vovchuk Ye. B., Bilinsky A. I., Blahodyr Ya. T., Virun N. V., Apunevych S. V. — We continued investigation of behavior of artificial satellites on orbit based on the complex comparison of the parameters of solar wind and geomagnetical activity with the changes of periods of orbital motion of the satellites. We used: 1) the periods of orbital motion of uncontrolled satellites from database of Ukrainian network of optical stations (YMOС) for 2012—2014 years; 2) the geomagnetic planetary indexes K_p ; 3) the energy spectra of protons and electrons obtained by satellites type GEOS for events during which the periods of orbital rotation of the satellites changed (all helio- and geo-data were taken from the database of Space Weather Prediction Center NOAA). We obtained, that energy spectra of streams of protons and electrons have no effect softening of the spectrum over time — to the time when a flare appears. It indicates the possibility of accumulation of particles over the active region (AR), causing further continuous energy discharge from the AR — a solar flare. We obtained relations between geomagnetic activity and solar wind speed at a given interplanetary magnetic field intensity for studied temporal changes of orbital motion periods of the artificial satellites of the Earth. The calculated correlation coefficients are of high values 0.93—0.96.

Предмет дослідження і спостережний матеріал. Найагресивнішим чинником впливу на навколоземне середовище є сонячні спа-

лахи. Вони є головним джерелом корпускулярного і рентгенівського випромінювання. Під час спалахів зростають потоки високоенергетичних частинок — протонів, електронів, які формують сонячний вітер. Інтенсивність цих потоків зростає в сотні і тисячі разів при рентгенівських спалахах; менш потужними є оптичні спалахи.

У роботі продовжуються дослідження поведінки на орбіті штучних супутників Землі (ШСЗ) на основі комплексного зіставлення параметрів сонячного вітру із змінами періодів орбітального руху цих супутників (див. роботу [2]). На теперішній час питання про вплив сонячного вітру на зміну поведінки на орбіті ШСЗ залишається доволі складним.

Вхідними матеріалами цього дослідження послужили цілодобові спостереження спалахів^{*}, параметрів сонячного вітру^{**}, геомагнітних планетарних індексів K_p ^{***} з бази даних Центру прогнозування космічної погоди SWPC NOAA. Ці спостереження проводяться геостационарними супутниками класу GEOS.

Об'єктами дослідження були вибрані некеровані низькоорбітальні, середньоорбітальні та геосинхронні ШСЗ. Каталог даних щодо орбіт цих супутників розміщено на сайті української мережі оптичних станцій (УМОС)^{****}. Використано дані спостережень за 2012—2014 рр. Список досліджуваних супутників та деякі характеристики їхніх орбіт наведено у табл. 1.

У табл. 2 наведено дані про періоди обертання трьох дестабілізованих ШСЗ, що перебувають на різних орбітах: а) низька навколосемна орбіта ШСЗ-27386 (висота перигею $h = 725$ км), б) середня навколосемна орбіта ШСЗ-16908 ($h = 1470$ км), в) геосинхронна орбіта ШСЗ-21821 ($h = 35820$ км).

Таблиця 1. Дані УМОС щодо орбіт досліджуваних ШСЗ за 2012—2014 рр.

Номер NORAD	Кількість орбіт	Період, хв	Нахил, град	Перигей, км	Апогей, км
33412	9	97.06	97.96	609.88	625.45
27386	10	100.07	98.42	748.49	774.74
25106	14	100.29	86.34	762.41	782.40
36588	17	109.32	100.52	1182.37	1207.85
26997	8	112.08	66.05	1317.74	1327.02
33105	7	112.29	66.05	1325.95	1338.29
22076	8	112.35	66.05	1328.40	1340.43
16908	23	115.66	49.98	1477.16	1493.75
23440	12	127.62	64.79	1875.77	2161.55
21821	9	1435.88	14.15	35746.49	35818.35
23839	5	1436.14	0.40	35768.14	35806.67
25473	5	1436.05	0.07	35772.54	35798.78

* ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DSD.txt (2012,2013,2014)

** ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DPD.txt (2012,2013,2014)

*** ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DGD.txt (2012,2013,2014)

**** <http://umos.mao.kiev.ua/ukr/index.php/slab=orbits@satl> (2012,2013,2014)

Таблиця 2. Періоди обертання ШСЗ протягом кількох неперервних часових інтервалів спостережень в 2012—2014 рр.

ШСЗ-27386		ШСЗ-16908				ШСЗ-21821	
Дата	P , хв	Дата	P , хв	Дата	P , хв	Дата	P , хв
17.05.12	100.08	11.03.12	115.63	07.11.13	115.63	28.07.13	1436.07
18.05.12	100.05	12.03.12	115.69	08.11.13	115.69	29.07.13	1435.98
19.05.12	100.09	13.03.12	115.70	09.11.13	115.65	30.07.13	1435.96
20.05.12	100.03	14.03.12	115.71	18.09.14	115.68	31.07.13	1436.00
24.07.12	100.05	15.03.12	115.67	19.09.14	115.67	01.08.13	1436.02
25.07.12	100.08	16.03.12	115.68	20.09.14	115.66	02.08.13	1436.05
26.07.12	100.09	19.08.13	115.66	21.09.14	115.66	07.11.13	1435.25
10.06.13	100.06	20.08.13	115.69	28.10.14	115.63	08.11.13	1435.23
11.06.13	100.07	21.08.13	115.62	29.10.14	115.62	09.11.13	1435.28
12.06.13	100.05	22.08.13	115.65	30.10.14	115.66		
		05.11.13	115.68	31.10.14	115.62		
		06.11.13	115.64				

Таблиця 3. Кількість спалахів, які передували змінам періодів обертання ШСЗ у межах відповідних часових інтервалів спостережень у 2012—2014 рр.

Дата	Кількість рентгенівських спалахів балу			Кількість оптичних спалахів балу			
	С	М	Х	s	1	2	3
09—17.03.12	35	6	—	22	3	—	—
14—20.05.12	24	1	—	29	—	—	—
16—26.07.12	23	2	—	31	2	—	—
03—12.06.13	9	2	—	10	2	1	—
25.07—02.08.13	18	—	—	42	3	1	—
15—22.08.13	27	2	—	33	1	1	—
02—09.11.13	68	9	2	47	8	1	—
15—21.09.14	29	1	—	24	1	—	—
25—31.10.14	43	22	5	87	10	5	3

У табл. 3 наведено наведені деякі дані про спалахи, які передували змінам періодів обертання трьох дестабілізованих ШСЗ у межах відповідних часових інтервалів спостережень у 2012—2014 рр.

На рис. 1 наведено енергетичні спектри протонів з енергіями $E_p > 1, 10$ та 100 MeV. На рис. 2 також наведені енергетичні спектри електронів з енергіями $E_e > 0.8$ MeV і $E_e > 2$ MeV. Часові інтервали на обох рисунках охоплюють межі, у яких змінювались періоди обертання ШСЗ.

Отримані результати. При зіставленні рис. 1 і рис. 2 з даними про спалахи, що передували змінам періодів обертання ШСЗ (табл. 2) стає очевидним, що сонячні спалахи супроводжуються збільшенням інтенсивності рентгенівського і корпускулярного випромінювання: у спектрах протонів і електронів спостерігався ефект підвищення жорсткості спектра з часом до моменту появи спалаху. Протонна і електронна концентрації збільшуються на порядок-два з подальшим

Рис. 1. Енергетичні спектри протонів, в часових межах яких змінювалися періоди обертання ПСЗ: *a* — для енергій $E_p > 1$ MeV; *б* — для енергій $E_p > 10$ MeV; *в* — для енергій $E_p > 100$ MeV

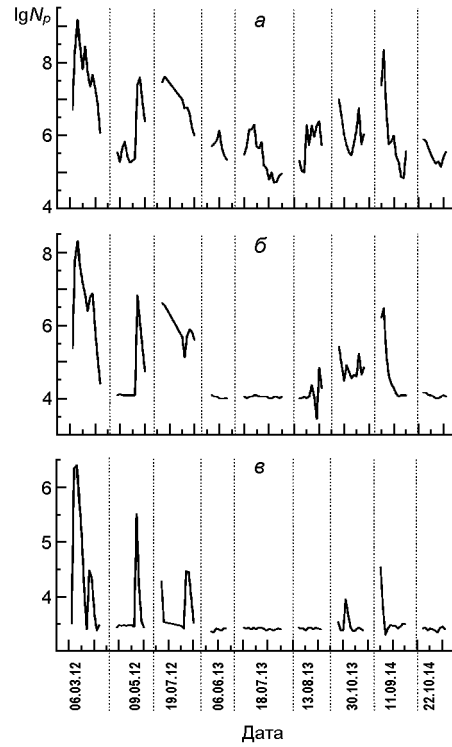
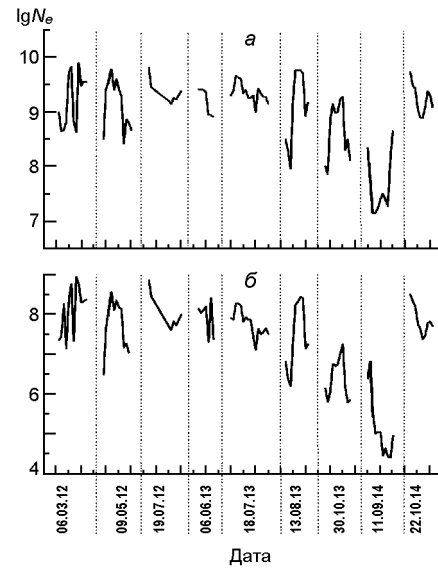


Рис. 2. Енергетичні спектри електронів для тих же часових інтервалів: *a* — для енергій $E_e > 0.8$ MeV; *б* — для енергій $E_e > 2$ MeV



різким зменшенням. Це вказує на можливість накопичення частинок над активною областю (АО), що спричиняє наступний неперервний відвід енергії з АО — сонячний спалах. Отже, різке збільшення таких параметрів сонячного вітру, як протонна і електронна концентрації, призводить до прискореного зменшення періоду орбітального руху супутника і навпаки.

Були обчислені коефіцієнти кореляції між значеннями періоду обертання P та величинами протонної і електронної концентрації в до-

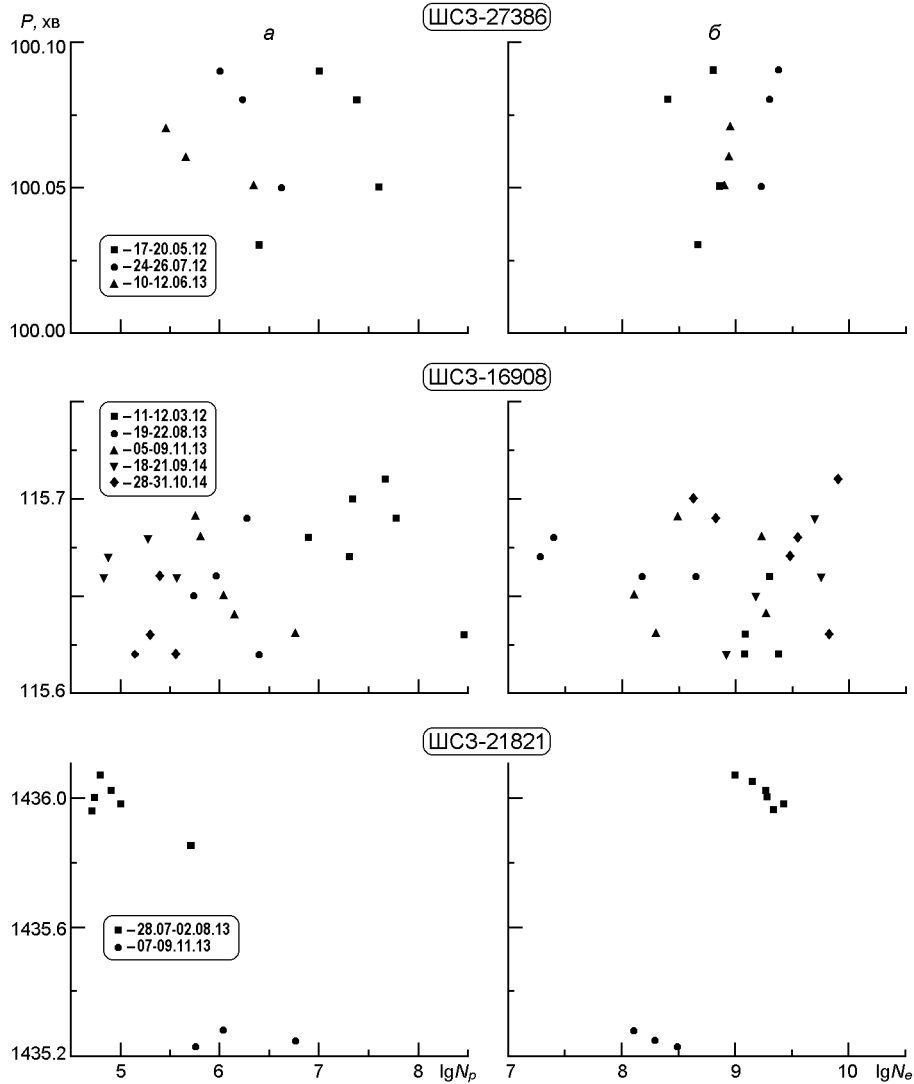


Рис. 3. Залежність періоду орбітального обертання P від енергетичних спектрів: a — протонів з енергіями $E_p > 1$ МеВ, $б$ — електронів з енергіями $E_e > 0.8$ МеВ для ШСЗ-27386, ШСЗ-16908 та ШСЗ-21821

би, наближені до спостережень періодів ШСЗ. Результати аналізу зображені на рис. 3 для трьох вибраних супутників.

Коефіцієнти кореляції між P і $\lg N_p$ з енергіями $E_p > 1$ МеВ набувають від'ємних значень, а саме: від -0.70 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.88 (для геосинхронних ШСЗ); з енергіями $E_p > 10$ МеВ — від -0.75 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.90 (для геосинхронних ШСЗ); з енергіями $E_p > 100$ МеВ — від -0.79 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.92 (для геосинхронних ШСЗ).

Як відомо, коливання періодів обертання ШСЗ вказують на зміну густини верхньої атмосфери Землі [1, 3, 4]. Можливо, при збільшенні інтенсивності сонячного вітру відбувається деяке зменшення густини

атмосфери, чим і пояснюється відзначене явище сповільнення темпу зменшення періоду обертання супутника.

Ці характеристики сонячного вітру вносять суттєвий вклад у варіації геомагнітної активності, яка найкраще описується планетарним індексом геомагнітного збурення K_p .

Вивчення зв'язку рівня геомагнітної активності з параметрами сонячного вітру становить інтерес з точки зору механізму взаємодії потоків сонячного вітру з магнітосферою. Більше того, є можливість визначення цих параметрів з індексів геомагнітної активності.

Як приклад, можна розрахувати швидкість V сонячного вітру по сумарному планетарному індексу геомагнітної активності K_p . Відповідну емпіричну формулу запропоновано у роботі [5]:

$$V = (8.44 - 0.74) K_p + (330 - 17) \text{ км/с.}$$

Але факти вказують на те, що відповідність між V і K_p неоднозначна. Для підвищення точності розрахунків треба враховувати ще і напруженість міжпланетного магнітного поля, яка в середньому становить $\tilde{H} = 5$. Довготривалі дослідження [6] дали можливість отримати однозначну залежність між V і K_p при різних значеннях величини H :

$$V = 10 K_p + 225 \text{ км/с, якщо } H = 6,$$

і

$$V = 12 K_p + 270 \text{ км/с, якщо } H = 4.$$

Результати, отримані нами для часових проміжків, у межах яких змінюються орбітальні періоди ШСЗ, наведено на рис. 4.

З рис. 4 видно, що при одній і тій же швидкості сонячного вітру V більшій напруженості магнітного поля H відповідають більші значення геомагнітного індексу K_p . Далі були обчислені коефіцієнти кореляції, що зв'язують V і K_p ; вони набувають високих значень: $r = 0.93$ для $H = 6$ і $r = 0.96$ для $H = 4$.

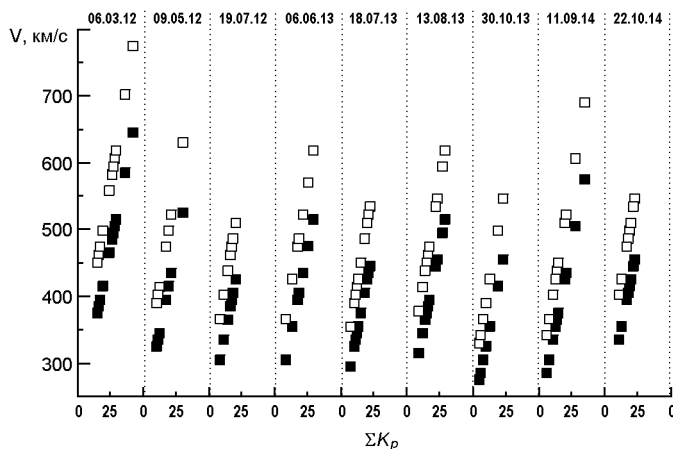


Рис. 4. Корелятивна залежність між планетарним індексом геомагнітної активності K_p і швидкістю сонячного вітру V : світлі квадратики — при $H = 4$, темні — при $H = 6$

Аналіз співвідношень між швидкістю сонячного вітру V і K_p -індексом свідчить, що міжпланетне магнітне поле H визначає чутливість магнітосфери Землі до потоків сонячного вітру та регулює дію потоків плазми на геомагнітне поле.

Висновки. Комплексне дослідження впливу сонячного вітру на зміну поведінки орбітального руху штучних супутників Землі дало змогу дійти таких висновків.

— Сонячні спалахи супроводжуються збільшенням в сотні-тисячі разів інтенсивності сонячного вітру, зокрема потоків протонів з енергіями від $E_p > 1$ MeV до $E_p > 100$ MeV та електронів з енергіями від $E_e > 0.8$ MeV до $E_e > 2$ MeV. Таке підвищення інтенсивності сонячного вітру спричиняє сповільнення темпу зменшення періодів орбітального руху ШСЗ.

— Бурхливі сплески високоенергетичних потоків протонів і електронів, які формують сонячний вітер, призводять до варіацій геомагнітної активності, що, у свою чергу, впливає на зміну орбітальних періодів ШСЗ.

— Отримано, що врахування напруженості міжпланетного магнітного поля усуває певну неоднозначність у вказаній залежності між швидкістю сонячного вітру і геомагнітною активністю. Виявлено чітку додатну кореляцію між швидкістю сонячного вітру V , параметром геомагнітної активності K_p і напруженістю міжпланетного магнітного поля H .

1. Етшиев В. П., Исак И. И., Кудак В. И. и др. Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства // Космична наука і технологія.— 2012.— **18**, № 1.— С. 60—67.
2. Ковальчук М. М., Гірняк М. Б., Баран О. А. и др. Дослідження впливу геліогеоактивності на динаміку орбітальних параметрів штучних супутників Землі // Кинематика и физика небес. тел.— 2017.— **33**, № 5.— С. 61—68.
3. Маслова А. И., Пироженко А. В. Изменения плотности атмосферы при движении космических аппаратов на низких околоземных орбитах // Космична наука і технологія.— 2009.— **15**, № 1.— С. 13—18.
4. Сантора Ф. А. Влияние аэродинамического сопротивления на движение спутников по орбитам, близким к круговым, в несферичной изменяющейся в течение суток атмосфере // Ракетная техника и космонавтика.— 1976.— **14**, вып. 9.— С. 53—58.
5. Snyder W., Neugebauer M., Rao U. R. The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and with solar and geomagnetic activity // J. Geophys. Res.— 1963.— **68**.— P. 6361—6370.
6. Wilcox I. M., Schatten K. H., Ness N. F. Influence of interplanetary magnetic field and plasma on geomagnetic activity during quiet-sun conditions // J. Geophys. Res.— 1967.— **72**, N 1.— P. 19—26.

Стаття надійшла до редакції 03.10.16