

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, Україна
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, Україна
e-mail: sofiya.apunevych@gmail.com

Дослідження впливу геліогеоактивності на динаміку орбітальних параметрів штучних супутників Землі

Досліджується вплив активних процесів на Сонці та їхнього відгуку в навколоземному середовищі (космічної погоди) на динаміку штучних супутників Землі. Об'єктами досліджень вибрано некеровані супутники, елементи орбіт яких приведено в каталогах на сайті української мережі оптичних станцій (УМОС). Встановлено зв'язок між характеристиками сонячної активності та коливаннями періодів P орбітального руху ШСЗ. Ці коливання в основному вказують на зміни густини атмосфери Землі, спричинені як сонячною активністю (індекс $F_{10.7}$), так і геомагнітною активністю (індекс K_p). Великі значення коефіцієнтів кореляції між P і $F_{10.7}$ ($-0.77\dots-0.91$) та між P і K_p ($-0.67\dots-0.89$) свідчать про суттєвий вплив геліо- і геоактивності на орбітальні періоди ШСЗ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕЛИОГЕОАКТИВНОСТИ НА ДИНАМИКУ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ, Ковальчук М. М., Гирняк М. Б., Баран А. А., Стоділка М. И., Вовчик Э. Б., Билинский А. И., Благодир Я. Т., Вирун Н. В., Апуневич С. В. — Исследуется влияние активных процессов на Солнце и их отклика в околоземной среде (космической погоды) на динамику искусственных спутников Земли. Объектами исследований выбраны неуправляемые спутники, элементы орбит которых приведены в

каталогах на сайті української мережі оптичних станцій (УМОС). Установлено зв'язок між характеристиками сонячної активності та коливаннями періодів P орбітального руху ШСЗ. Ці коливання в основному вказують на зміни густоти атмосфери Землі, викликані як сонячною активністю (індекс $F_{10.7}$), так і геомагнітною активністю (індекс K_p). Високі значення коефіцієнтів кореляції між P та $F_{10.7}$ ($-0.77\dots-0.91$) та між P та K_p ($-0.67\dots-0.89$) свідчать про суттєвий вплив геліо- та геоактивності на орбітальні періоди супутників.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF HELIOGEOACTIVITY ON THE DYNAMICS OF ORBITAL PARAMETERS OF 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. — The main factor of changes of behavior of artificial satellites of the Earth on the orbit is the influence of aggregate of active processes on the Sun (so-called space weather) and their response in the near-Earth environment. The influence of heliogeoaactivity on the dynamics of artificial satellites was investigated. The selected objects are the uncontrolled satellites, their elements of orbits are from the database of Ukrainian network of optical stations (УМОС). As a result a comprehensive research was established relationship between the characteristics of solar activity, their response in the near-Earth environment and variations of periods P of the orbital motion of artificial satellites. These variations mainly denote changes in the density of Earth's atmosphere caused by a solar (index $F_{10.7}$) and geomagnetic activity (K_p index). The correlation coefficients of P and $F_{10.7}$ ($-0.77\dots-0.91$) and of P and K_p ($-0.67\dots-0.89$) are the evidence of significant connection between them. The obtained results are good indicator of influence of helio- and geoactivity on the periods of the satellites.

Вступ. Основною проблемою досліджень поведінки на орбіті штучних супутників Землі (ШСЗ) та тіл техногенного походження є контроль за варіаціями періодів їхнього обертання [3, 7]. Головним чинником таких змін є вплив космічної погоди (КП) — сукупності явищ, що відбуваються у верхніх шарах земної атмосфери, в іоносфері та в навколоземному космічному просторі під дією космічних факторів [6].

Потрібні довготривалі спостереження за станом КП в широкому діапазоні висот, узагальнення і систематизація отриманих даних, аналіз якісних і кількісних особливостей складових факторів, що збуджують орбітальні рухи. У залежності від висоти орбіти супутника кількість таких складових і їхня роль буде різною [8]. Тому в одному випадку достатньо врахувати дію на ШСЗ тільки потоків світлового і корпускулярного випромінювання від Сонця, а в іншому — ще й вплив опору земної атмосфери або магнітного поля Землі.

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

Номер NORAD	Кількість орбіт	Період, хв	Нахил, град	Висота перигею, км	Висота апогею, 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

Предмет дослідження і спостережний матеріал. Робота присвячена дослідженням впливу КП на орбітальні параметри ШСЗ. Для аналізу були використані дані про спалахи^{*}, параметри сонячного вітру^{**} та значення геомагнітних планетарних індексів K_p ^{***} з бази даних Центру прогнозування космічної погоди SWPC NOAA за 2012—2014 рр. Об'єктами дослідження були вибрані некеровані низькоорбітальні, середньоорбітальні та геосинхронні супутники. Елементи орбіт цих супутників взято з каталогу української мережі оптичних станцій (УМОС)^{****}. Ці дані наведено в таблиці.

Основна мета нашого комплексного дослідження полягає в тому, щоб встановити зв'язок між спостережуваними характеристиками сонячної активності, їхнім відгуком в навколоземному середовищі та коливаннями періодів орбітального руху ШСЗ. Як відомо, коливання періодів обертання ШСЗ вказують на зміну густини верхньої атмосфери Землі [2, 4, 5]. В основному такі зміни зв'язані з рівнем геомагнітного збурення, що отримало назву геомагнітного ефекту. Кількісну характеристику зміни густини з рівнем геомагнітної активності визначено в роботі [1] як

$$\rho_0(1 - K_p),$$

де ρ_0 — середнє незбурене значення густини атмосфери на певній висоті: на $h = 500$ км $\rho_0 = 4.76 \cdot 10^{-13}$ кг²/м³; на $h = 1000$ км $\rho_0 = 1.49 \cdot 10^{-17}$ кг²/м³; на $h = 2000$ км $\rho_0 = 9.09 \cdot 10^{-17}$ кг²/м³. Коефіцієнт $\rho = 0.13 \dots 0.21$,

K_p — середньодобовий планетарний індекс геомагнітної активності. В розрахунках підвищеної точності, крім індекса геомагнітної активності, враховується середньодобове значення індекса сонячної

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

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

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

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

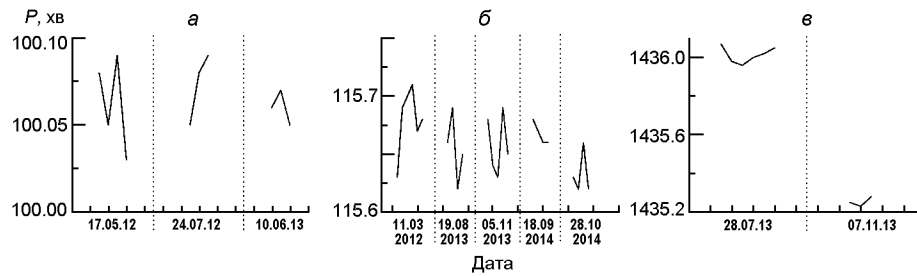


Рис. 1. Періоди обертання P на інтервалі 2012—2014 рр.: а, б, в — для супутників ШСЗ-27386, ШСЗ-16908 та ШСЗ-21821 відповідно

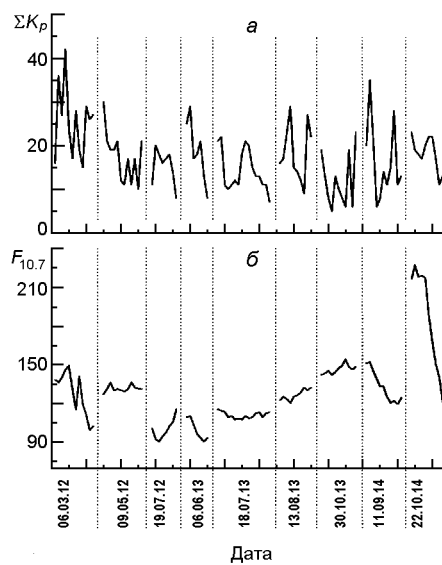


Рис. 2. Зміни сумарного планетарного індексу K_p (а) та потоку $F_{10.7}$ сонячного випромінювання (б) протягом 2012—2014 рр.

активності $F_{10.7}$ — потоку сонячного радіовипромінювання на довжині хвилі $\lambda = 10.7$ см.

На рис. 1 наведено графіки зміни періодів обертання трьох характерних штучних супутників Землі на різних орбітах: а) низька навколосезна орбіта ШСЗ-27386, висота перигею $h = 725$ км; б) середня навколосезна орбіта ШСЗ-16908, висота перигею $h = 1470$ км; в) геосинхронна орбіта ШСЗ-21821, висота перигею $h = 35820$ км. Ці супутники перебувають в режимі дестабілізації та спостерігалися протягом кількох неперервних часових інтервалів у 2012—2014 рр.

На рис. 2 показано зміни значень сумарного добового планетарного індексу K_p та зміни значень індексу сонячної активності $F_{10.7}$, отримані протягом часу спостережень вибраних супутників.

Отримані результати. Ми обчислили параметри лінійної регресії та коефіцієнти кореляції між значеннями періоду обертання P ,

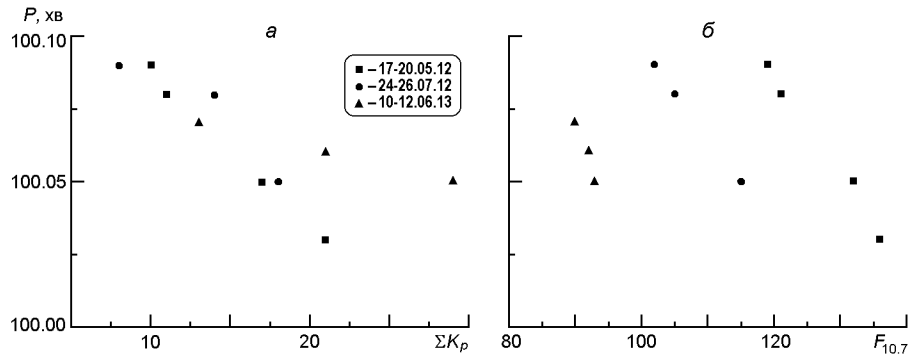


Рис. 3. Залежність періоду обертання P від геомагнітного індексу K_p (а) та величини потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ (б) для ШСЗ-27386

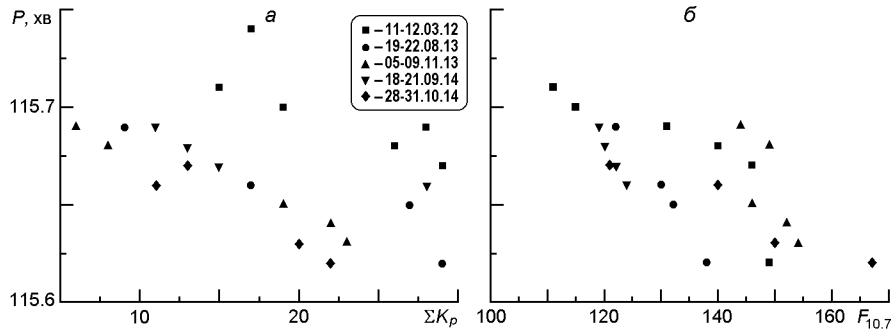


Рис. 4. Те ж для ШСЗ-16908

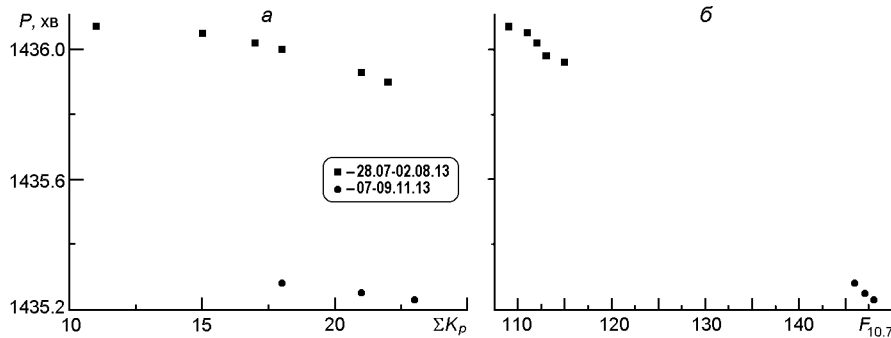


Рис. 5. Те ж для ШСЗ-21821

геомагнітного індексу K_p і потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$ в дати, найближчі до спостережень періодів ШСЗ. Отримані залежності між P і K_p та між P і $F_{10.7}$ для вибраних супутників ШСЗ-27386, ШСЗ-16908 і ШСЗ-21821 зображено відповідно на рис. 3—5.

Нам вдалося виявити суттєву кореляцію між змінами періодів орбітального обертання штучних супутників, що знаходяться на висоті порядку 35800 км над поверхнею Землі, і змінами сонячної активності, а саме: при збільшенні потоку випромінювання Сонця $F_{10.7}$, як

видно з рис. 5, для геосинхронних ШСЗ досить врахувати вплив на періоди обертання цих супутників тільки потоку випромінювання від Сонця, тоді як для ШСЗ з низькою і середньою окологлобальною орбітою (рис. 3, 4) — ще й вплив зі сторони магнітного поля Землі. Ми обчислили коефіцієнти кореляції між періодом орбітального обертання P супутника і геомагнітним індексом K_p та між P і величиною потоку радіовипромінювання Сонця на $\lambda = 10.7$ см. Вони є від'ємними. Значення коефіцієнтів кореляції між P і K_p лежать в межах від -0.67 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.89 (для геосинхронних ШСЗ). Значення коефіцієнтів кореляції між P і $F_{10.7}$ змінюються від -0.77 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.91 (для геосинхронних ШСЗ). Більше того, як показують дані спостережень, при зменшенні періоду обертання штучні супутники наближаються до Землі (перигей скорочується на кілька кілометрів).

Висновки. Отримані результати комплексного дослідження впливу сонячної та геомагнітної активності на динаміку орбітальних параметрів ШСЗ дали змогу дійти таких висновків.

— Коефіцієнти кореляції між періодом орбітального руху P супутника і геомагнітним індексом K_p набувають високих від'ємних значень (від -0.67 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.89 (для геосинхронних ШСЗ)).

— Коефіцієнти кореляції між періодом P супутника та індексом сонячної активності $F_{10.7}$, що характеризує потік сонячного випромінювання на довжині хвилі 10.7 см, досягають значень від -0.77 (для низькоорбітальних ШСЗ) до -0.91 (для геосинхронних ШСЗ).

— Висока геліо- і геоактивність спричиняє зменшення періоду обертання супутника з одночасним скороченням перигею на кілька кілометрів.

Отже, отримані результати є надійним індикатором кореляційної залежності між періодом орбітального обертання супутників і впливом на них як геліо-, так і геопараметрів. Ці результати мають практичну цінність, що полягає у розробці прогнозних моделей, які передбачають стан космічної погоди.

1. Гогошева Ц. Н., Климов Н. Н., Серафимов К. Б. Перестройка нейтральной атмосферы на высотах области F ионосферы во время геомагнитных возмущений // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.—1977.—Вып. 41.—с.7.—С. 17.
2. ГОСТ 25645.115-84. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. — Введ. 24.08.84. — М.: Изд-во стандартов, 1984.—44 с.
3. 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 исследования поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства // Космична наука і технологія.—2012.—18, № 1.—С. 60—67.

4. *Маслова А. И., Пироженко А. В.* Изменение плотности атмосферы при движении космических аппаратов на низких околоземных орбитах // *Космічна наука і технологія.*—2009.—**15**, № 1.—С. 13—18.
5. *Сантора Ф. А.* Влияние аэродинамического сопротивления на движение спутников по орбитам, близким к круговым, в несферической изменяющейся в течение суток атмосфере // *Ракетная техника и космонавтика.*—1976.—**14**, вып. 9. —С. 53—58.
6. *Федоров Е. К.* Глобальные исследования атмосферы и прогноз погоды. — М., 1971.—39 с.
7. *Guglya L., Ryabov M. Panishko S., Suharev A.* Dynamic characteristics of the main indexes of the space weather and their application to the analysis monitoring observations flux densities of power radio sources on RT URAN-4 // *Odessa Astron. Pubs.*—2012.—25/2.—P. 207—209.
8. *Komendant V. H., Koshkin N. I., Ryabov M. I., Sukharev A. L.* Influence of space weather effects on the upper atmosphere according to the drag of artificial Earth satellites // *Odessa Astron. Pubs.*—2014.—27/1.—P. 89—90.

Стаття надійшла до редакції 03.10.16