

УДК 537.876.23

Д. Ф. Дудкін¹, В. О. Проненко¹, В. Є. Корепанов¹, С. І. Клімов²

¹ Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Львів

² Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва, Росія

ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ У НАВКОЛОЗЕМНОМУ ПРОСТОРИ

Аналізується експериментально виявлене останнім часом на декількох супутниках явище випромінювання гармонік ліній електропередач, яке спостерігається в іоносфері. Отримані дані дають підставу наголошувати на необхідності постійного супутникового моніторингу іоносферних техногенних збурень для об'єктивного оцінювання та прогнозу космічної погоди. Припускається, що розвиток методу дозволить створити карту електромагнітного забруднення довкілля Землі в локальному та глобальному масштабах.

ВСТУП

Одним з основних напрямків досліджень навколоземного космічного простору є вивчення й прогнозування космічної погоди. Про важливість цієї галузі науки свідчить велика кількість робіт [1, 6, 8, 15, 16, 19, 27]. Оцінки, пов'язані з космічною погодою, здійснюються не лише для технічних систем [14], але й для ділової активності. Зокрема, відома страхова компанія Ллойда опублікувала звіт про вплив космічної погоди на ризики бізнесу [31]. Вказані дослідження стосуються в основному оцінки впливу сонячної активності на іоносферу й атмосферу Землі (тобто досліджуються наслідки передачі енергії в напрямі Сонце — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — поверхня Землі) і, як правило, не враховують слабшу, але тим не менш істотну дію у зворотному напрямі потужних природних і техногенних процесів, які відбуваються на поверхні Землі. Факт такої зворотної дії є загально-визнаним, і інтерес до нього постійно збільшується у зв'язку зі зростанням виробничої діяльності людства.

Як показують останні результати спостережень, основну складову техногенного впливу

становлять джерела електромагнітної (ЕМ) енергії, до яких належать потужні передавачі та випромінювачі в усьому діапазоні радіохвиль, електростанції, лінії електропередач і промислові об'єкти. Досить давно встановлено, що потужні наземні джерела і споживачі електричної енергії викликають різні іоносферні явища, зокрема зміни ЕМ-поля і параметрів плазми в іоносфері, які, у свою чергу, впливають на стан атмосфери Землі. Можливі наслідки техногенної дії на іоносферу, при стійкій тенденції до збільшення, на сьогодні не відомі. Тому дуже важливим і актуальним завданням є проведення статистично достовірних досліджень варіацій іоносферних параметрів, пов'язаних зі впливом потужних техногенних чинників, передусім завдяки значному збільшенню виробництва електроенергії. Саме в цій галузі в 1970-х рр. було відкрито новий ефект — проникнення в іоносферу і навіть у магнітосферу гармонійного випромінювання ліній високовольтних електромереж (PLHR) в діапазоні частот 2–2.5 кГц [13, 17, 26].

Механізм формування PLHR та можливі наслідки цього явища для цивілізації, яка постійно збільшує виробництво електроенергії, ще досі не мають пояснення. Однак уже відомо, що системи виробництва електроенергії впливають на навколоземне середовище як у локальному

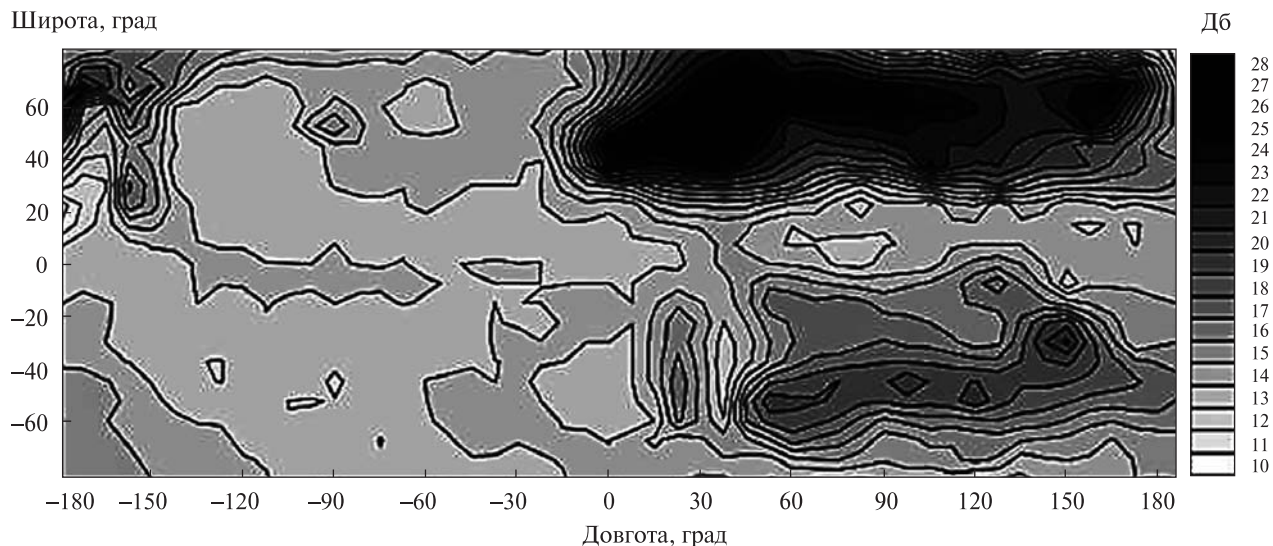


Рис. 1. Глобальний розподіл ЕМ-випромінювання в іоносфері в діапазоні частот 0.1–15 МГц (КОРОНАС-И, 31 березня 1992 р.)

масштабі, змінюючи стан іоносфери безпосередньо над лініями електромереж, так і у глобальному, створюючи у порожнині Земля — іоносфера ЕМ-коливання на частотах, пов’язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками. Одним з небезпечних наслідків цього явища є збільшення інтенсивності висипання заряджених часток з радіаційних поясів Землі, що досить часто спостерігається на борту штучних супутників Землі (ШСЗ) при реєстрації концентрації заряджених часток разом зі збільшенням впливу ЕМ-полів у іоносфері [25].

На сьогодні зрозуміло, що це явище потрібно вивчати з метою встановлення кількісних залежностей та можливих наслідків для нашого оточення при неминучому подальшому збільшенні виробництва електроенергії. Найзручніші можливості для спостереження за вивільненням ЕМ-енергії дає супутниковий моніторинг іоносфери та магнітосфери в діапазоні частот від десятків герц до десятків мегагерц із розширеною наземною підтримкою. При організації оперативного отримання даних і охопленні великих наземних площ такий моніторинг може стати ефективним інструментом для вивчення техногенного впливу на навколосезний космічний простір і, як наслідок, на космічну погоду, передусім з метою

визначення ймовірності досягнення природними системами критичного стану.

У нашій статті зроблено короткий огляд різних експериментальних досліджень цих явищ та їхніх імовірних наслідків для довкілля Землі, а також попередньо аналізуються нові дані, отримані в експериментах на борту ШСЗ «Січ-1М» та «Чибис-М».

ВІДОМІ ФАКТИ

Терагенні ЕМ-ефекти, тобто ефекти, викликані потужними процесами, які відбуваються на поверхні та в надрах Землі, спостерігалися в іоносфері вже першими науковими ШСЗ. Зокрема, ЕМ-випромінювання, зареєстроване низькоорбітальними супутниками «Інтеркосмос-19», «Космос-1809», «Активний» і АРЕХ, підтвердило істотне збільшення інтенсивності високочастотних ЕМ-шумів над населеними районами Європи і Азії [23, 24, 28]. У роботі [28] за допомогою приладу SORS-1, встановленого на борту супутника КОРОНАС-И, досліджено глобальний розподіл ЕМ-випромінювання у частотному діапазоні 0.1–15 МГц. При цьому над Євразійським континентом виявлене посилення рівня сигналу над фоном близько 20 дБ (рис. 1). Ці спостереження підтвердили, що природне ЕМ поле в



Рис. 2. Можливий вплив гармонічного випромінювання ліній електропередач на земне середовище (дані [25])

навколосемному просторі сильно «забруднене» людською діяльністю. Незважаючи на довгу історію супутникових спостережень ЕМ-полів, на ЕМ-забруднення навколосемного простору зверталось досить мало уваги. Проте останні дані супутникових і наземних спостережень показують зростання кількості реєстрацій техногенних сигналів, і цілком можливо, що у майбутньому цей ефект може призвести до неконтрольованого нагрівання атмосфери та іоносфери з невідомими на сьогодні наслідками, тому він потребує детальних досліджень. Можна припустити, що найбільшу небезпеку становлять системи виробництва і передачі електроенергії, оскільки обсяг виробництва її постійно збільшується.

Лінії електропередач можуть простягатися до кількох тисяч кілометрів і фактично є джерелом ЕМ-поля — антенами, які працюють на промисловій частоті та її гармоніках. Струм у потужних лініях електропередач може досягати декілька тисяч ампер. При цьому в силових трансформаторах і промисловому устаткуванні споживачів він містить, окрім основної частоти, ще й вищі гармоніки, ефективність випромінювання яких підвищується зі зростанням їхнього порядку (частоти). Для розуміння ролі випромінювань на вищих гармоніках слід зазначити, що національними стандартами різних країн зазвичай

регулюються коефіцієнти гармонійних складових напруги $K_{U(n)}$ та коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U . В ряді країн, наприклад США і Китаї, діє міжнародний стандарт IEEE Std 519-92, який пропонує такі норми для розглянутих величин: $K_U = 1.5\%$ і $K_{U(n)} = 1\%$. Ці норми мало відрізняються від норм європейського стандарту EN 50160.

Рис. 2 з роботи [25] ілюструє складність нелінійної взаємодії різних природних і техногенних чинників та показує, що вплив випромінювання ліній електропередач може викликати, у тому числі, й висипання енергетичних електронів з радіаційних поясів Землі. Фізика виявленого явища полягає у нелінійній взаємодії електричних і магнітних полів ліній електропередач з іоносферною/магнітосферною плазмою та зарядженими частинками в радіаційних поясах Землі.

Так, відомо, що ЕМ-поле ліній електропередач взаємодіє з плазмою іоносфери, зокрема призводить до нагрівання електронів [29]. У роботі [29] також доведено, що саме нагрівання електронів стало демаскуючим чинником передавача ВМС США у Вісконсіні. При цьому збільшення середньої температури електронів ($T_e = 300$ К) може досягати 10 %, залежно від часу доби і положення лінії. Такі відхилення можуть видатися

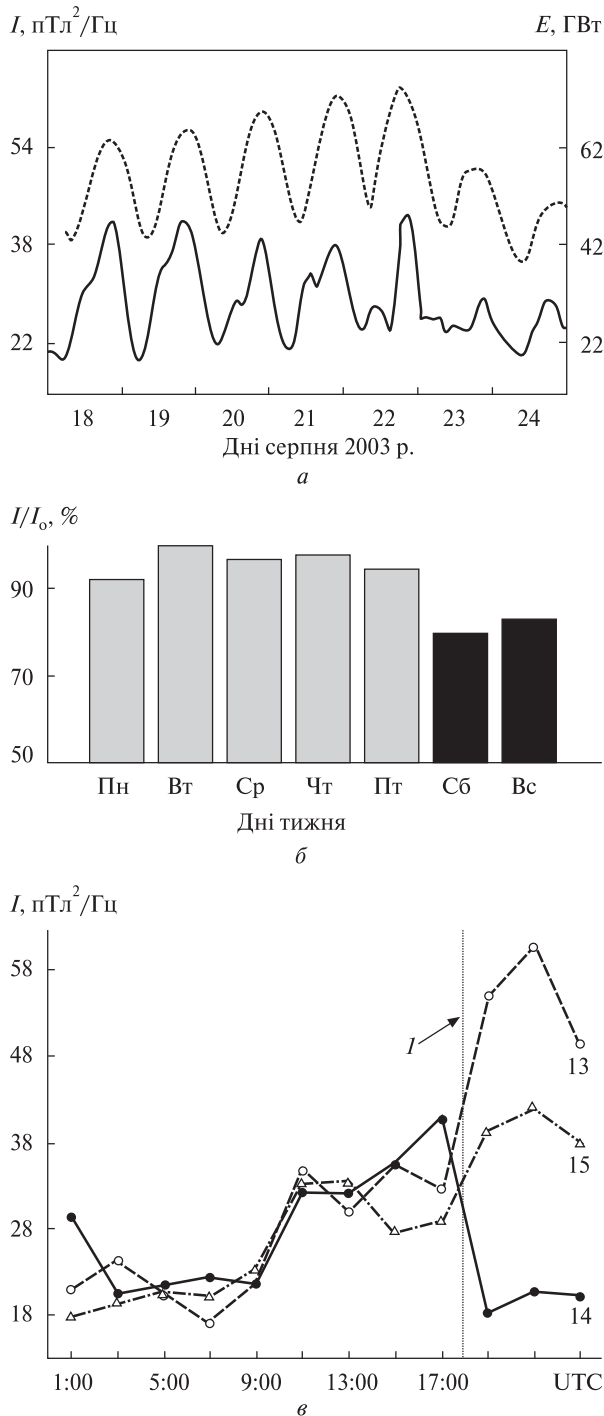


Рис. 3. Зміна інтенсивності I випромінювання 60 Гц, яка спостерігалась на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський»: *а* — порівняння реєстрованого випромінювання I (суцільна лінія, шкала зліва) з продукуваним обсягом енергії E (пунктирна лінія, шкала справа); *б* — усереднена за рік тижнева зміна інтенсивності випромінювання з частотою 60 Гц; *в* — денний хід інтенсивності лінії 60 Гц за три дні (13, 14 і 15 серпня 2003 р.). Вертикальна лінія — момент масштабного відімкнення електроенергії в Новій Англії (США) під час інтенсивної магнітної бурі 14 серпня 2003 р. [4]

невеликими, проте цей чинник діє постійно, вдень і вночі. В результаті сукупний ефект може стати істотним, особливо якщо розглядати не одну лінію, а, наприклад, регіональну систему енергопостачання, яка охоплює велику площу.

Слід зазначити, що локальні іоносферні ефекти від ліній електропередач реєструються не тільки в космічних експериментах, а й при наземних спостереженнях. Так, у роботі [4] достовірно зареєстровано зміни в режимі електропостачання на території США в районі Нової Англії у магнітоспряженій точці (рис. 3). Ці результати були отримані за допомогою високочутливих магнітометрів LEM1-112A (розроблених у Львівському центрі Інституту космічних досліджень), встановлених на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Добре видно локальні ефекти від змін режиму роботи системи енергопостачання: зниження споживання в кінці тижня та, особливо, вихід усієї системи з ладу (blackout) через інтенсивну магнітну бурю 14 серпня 2003 р. Це підтверджує, що струми в лініях електропередач генерують випромінювання, яке викликає помітні зміни в іоносфері та магнітосфері. Фізичний механізм цього явища досліджується вже досить давно [5, 9], але дотепер повної картини ще немає.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

На сьогодні нагромаджено досить багато експериментальних супутникових підтверджень існування кластерів спектральних ліній гармонік мережі 50 (60) Гц (аж до 10—15 ліній), центрованих біля середньої частоти в досить широкому діапазоні (приблизно 1—15 кГц). У експерименті «Варіант» на борту супутника «Січ-1М», запущеного у 2004 р. [10], було отримано всього 11 файлів, і у трьох з них були зареєстровані досить інтенсивні гармоніки частоти 50 Гц, розташовані кластерами в діапазоні частот від 1.5 до 14 кГц. Наведемо приклад найцікавішої події, коли ШСЗ перебував над південною частиною

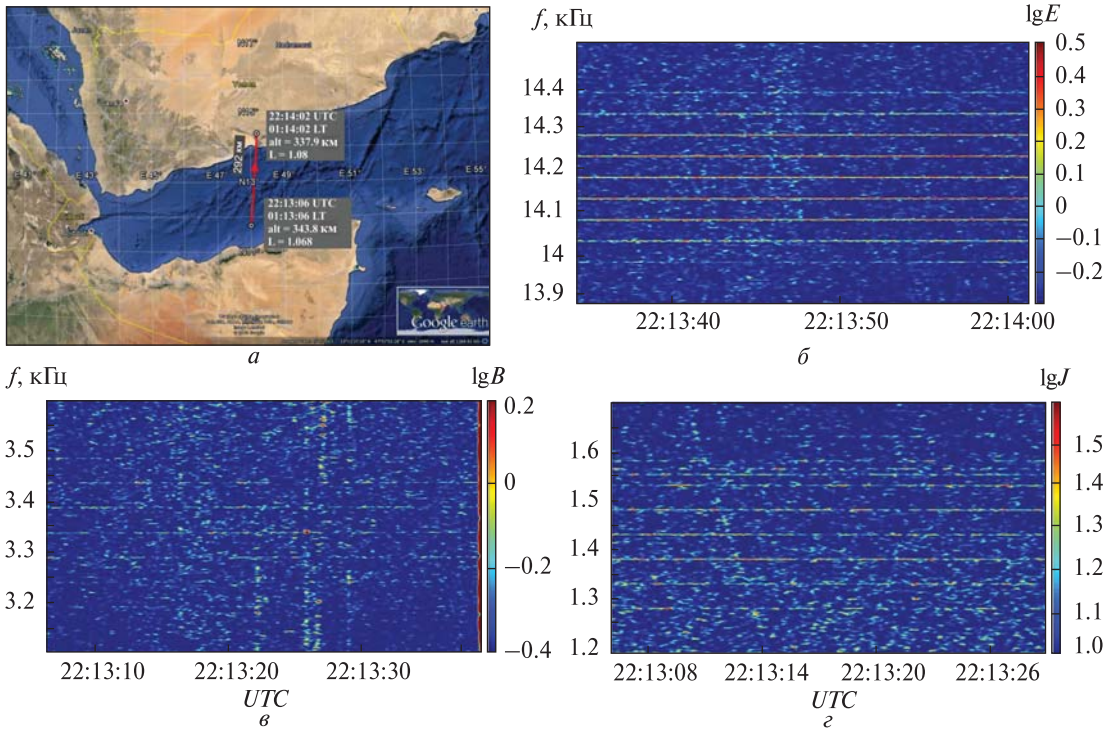


Рис. 4. Траекторія польоту супутника «Січ-1М» (а); б, в, г — гармоніки 50 Гц у ділянках частот близько 14, 3.4 і 1.4 кГц відповідно (тут B , пТл; E , мкВ/м; J , $\text{пА}\cdot\text{см}^{-2}$)

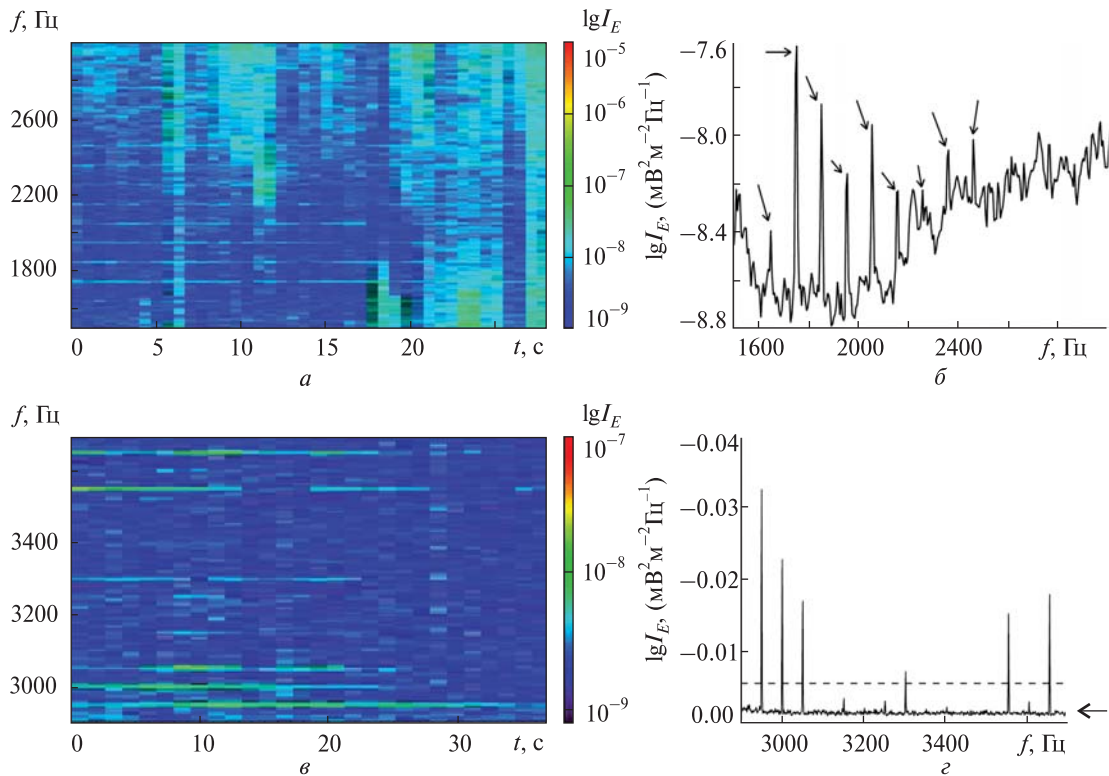


Рис. 5. Динамічний (а) та статичний (б) спектри рядів електричного поля, отриманих 25 березня 2006 р. о 19:13:32 UT при пролітанні супутника «Деметр» над територією Фінляндії [21], в, г — те ж для 21 вересня 2006 р. між 10:06:02 та 10:06:32 UT [22]

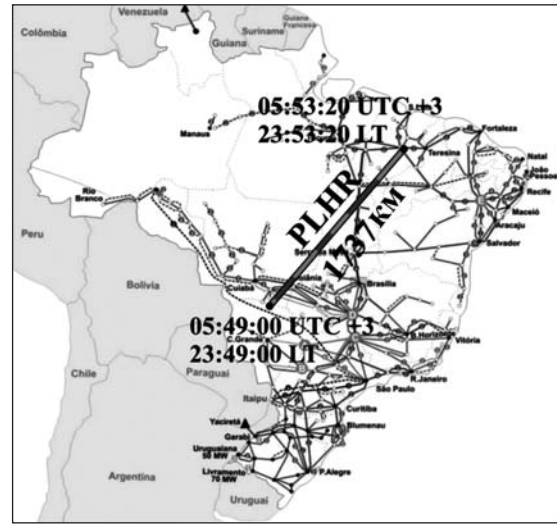
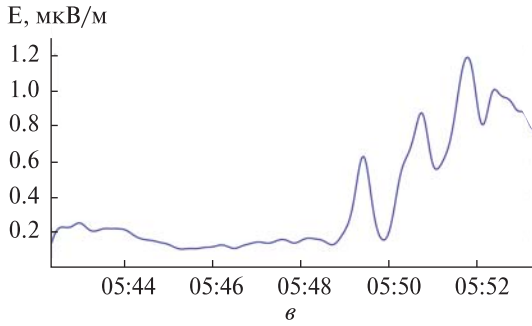
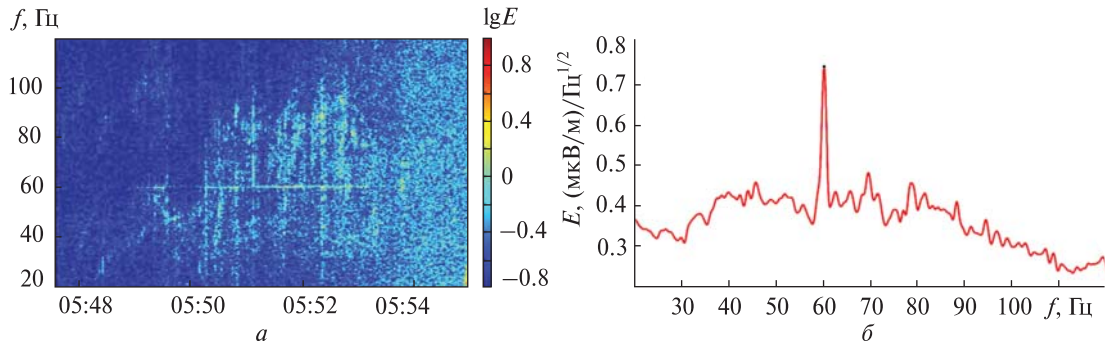


Рис. 7. Дані електричного каналу супутника «Чибис-М», отримані при пролітанні над територією Бразилії: *a* — динамічний спектр сигналу, *б* — статичний спектр сигналу, *в* — зміна амплітуди сигналу 60 Гц, *г* — ділянка траєкторії супутника над територією Бразилії і лінії високовольтних передач [12] (час UTC + 3)

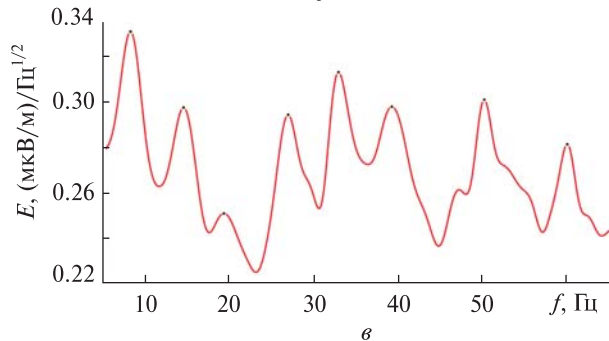
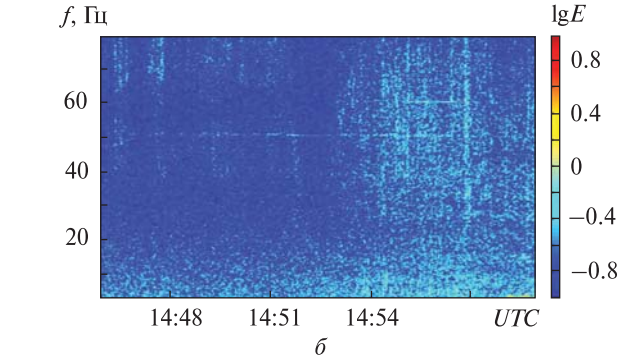
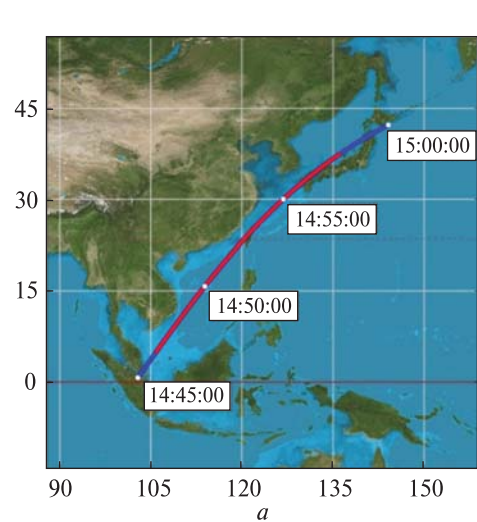


Рис. 8. Дані електричного каналу супутника «Чибис-М», отримані при пролітанні над територією південно-східної Азії та Японії: *a* — ділянка траєкторії супутника, *б* — динамічний спектр сигналу, *в* — статичний спектр сигналу

Аравійського півострова на висоті приблизно 340 км (див. кольорову вклейку, рис. 4, *a*). Особливістю цієї події була одночасна реєстрація кластерів гармонік 50 Гц відразу на декількох частотах — від 14 до 1.5 кГц (див. кольорову вклейку, рис. 4, *b*, *в*, *г* відповідно). Сигнали спостерігалися не лише в електричному, а й у магнітному полях та у варіаціях густини просторового струму (рис. 4, *в*, *г* відповідно). Зареєстровані сигнали, очевидно, викликалися струмами в лініях електропередач на території Арабських Еміратів, але загадкою залишається діапазон їхніх частот.

Як виявилось, такі кластери спостерігаються досить рідко — якщо через короткий термін роботи супутника «Січ-1М» були зареєстровані лише три такі події, то супутник «Деметер» (запущений у 2004 р.) успішно функціонував понад шість років, на його борту теж спостерігалися PLHR, але за весь цей час було ідентифіковано всього 146 таких випадків [20, 22]. При цьому виявилось, що гармоніки у кластерах можуть відстояти між собою як на 50 Гц, так і на 100 Гц. Як приклад, на рис. 5 (див. кольорову вклейку) показані динамічний (рис. 5, *a*) та статичний (рис. 5, *б*) спектри результатів вимірювання електричного поля, отримані 25 березня 2006 р. о 19:13:32 UT при пролітанні над територією Фінляндії [21]. При цьому різниця між сусідніми лініями складала 100 Гц. Подібні дані, отримані 21 вересня 2006 р. між 10:06:02 та 10:06:32 UT, подано на рис. 5, *в*, *г*. У цьому випадку різниця між сусідніми лініями складала вже 50 Гц [22].

Узагальнення накопиченої на той час інформації дозволило побудувати оцінки, подані на рис. 6: розподіл пікової інтенсивності I PLHR по широті φ (рис. 6, *a*) та усереднена кількість N подій, які спостерігалися на даній частоті (рис. 6, *б*) [21]. На жаль, незважаючи на численні спроби, досі пояснення цьому ефекту немає. Навіть про ділянку, де утворюються PLHR, ідуть суперечки — розглядаються гіпотези, що вони або створюються через нелінійні взаємодії в іоносфері, або ж генеруються на землі через спотворення форми струму у мережах.

Поштовх до звернення уваги на це явище дали результати, отримані в експерименті на ШСЗ «Чибис-М» (запущений 24 січня 2012 р. на

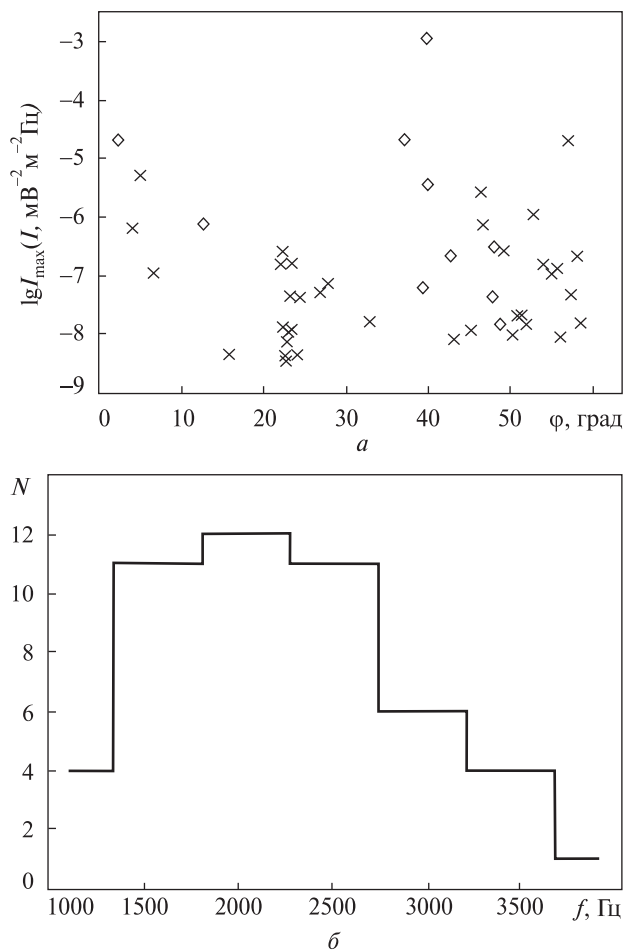


Рис. 6. Розподіл пікової інтенсивності I PLHR по широті (*a*) та усереднена кількість N подій, які спостерігалися на даній частоті (*б*) [21]

майже кругову орбіту висотою 500 км, припинив роботу 15 жовтня 2014 р.). До складу КНА «Гроза» цього супутника входив магнітно-хвильовий комплекс (МХК), який складався з двох хвильових зондів і одного індукційного магнітометра, створених у Львівському центрі Інституту космічних досліджень, та приладу спектрального аналізу ПСА (розробка VL-Electronics, Угорщина) [3]. МХК вимірював одну електричну складову і три складові вектора магнітного поля в діапазоні частот 0.1 Гц — 40 кГц з метою дослідження варіацій плазмово-хвильових процесів у іоносфері під впливом грозової активності, а також відображення в іоносфері потужних природних і техногенних процесів, які відбуваються

в системі ЛАІМ (літосфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера) [2]. Через високий рівень бортових завад, в основному від системи орієнтації та стабілізації супутника, практично всі дані магнітних каналів у ДНЧ-діапазоні виявилися непридатними для подальшого аналізу. Але дані давача електричного поля, який був розташований симетрично до корпусу супутника [2], виявилися набагато менше пошкоджені завадами, і спеціально створена програма «Denoise» дозволила ефективно і з високою чутливістю виділяти корисні сигнали у електричному каналі, особливо у моменти, коли систему орієнтації було відімкнено. Слід відзначити досить високу чутливість електричного каналу: незважаючи на те, що база електричного давача складала всього 0.42 м, його чутливість, визначена експериментально, була на рівні $4.24 \cdot 10^{-6}$ В/(мкВ/м), а рівень шумів — на рівні 0.14 та 0.04 (мкВ/м)Гц^{1/2} на частотах 0.1 Гц та 10 Гц відповідно.

На жаль, найімовірніше через невелику кількість даних, отриманих у високочастотному режимі опитування МХК, за більш як два роки роботи не було зареєстровано жодного високочастотного явища PLHR. Натомість було досить багато випадків реєстрації першої гармоніки електромережі 50 (60) Гц (на сьогодні знайдено загалом 33 реєстрації, сім з яких у денний локальний час, але оброблено ще не всі дані).

Так, на рис. 7 (див. кольорову вклейку) показано результати вимірювань, отримані від давача напруженості електричного поля при пролітанні ШСЗ «Чибис-М» над територією Бразилії (рис. 7, а — динамічний спектр сигналу, рис. 7, б — його статичний спектр, отриманий методом Велча, який забезпечує зниження рівня шуму за рахунок зменшення роздільної здатності по частоті [7]). Обробка даних дозволила виявити ще одну цікаву особливість — декілька моментів підвищення амплітуди сигналу 60 Гц під час пролітання (рис. 7, в). При аналізі наявної в інтернеті карти розташування високовольтних ліній електропередач на території Бразилії (рис. 7, г [12]) з'ясувалося, що кожен з цих піків відповідав моменту пролітання супутника над позначеними на карті високовольтними лініями (на траєкторії польоту ці моменти виділені темні-

шим кольором). Таке явище виявлено вперше і пізніше підтвердилось ще декількома спостереженнями.

Не менш цікаві результати вимірювань отримані з борту супутника «Чибис-М» при його пролітанні над південно-східною Азією та Японією (див. рис. 8, а на кольоровій вклейці). На рис. 8, б показаний динамічний спектр сигналів, а на рис. 8, в — статичний спектр. Добре видно основні гармоніки з частотами 50 та 60 Гц, які реєструються одночасно, що можна пояснити тим, що в Японії використовуються обидві ці частоти. Крім того, на обох спектрах чітко видно перші декілька гармонік шуманівських резонансів (ШР). Це другий випадок реєстрації гармонік ШР в іоносфері в історії супутникових спостережень. Зауважмо, що вперше гармоніки ШР були виявлені в іоносфері на супутнику С/NOFS, який, на відміну від короткого диполя на борту ШСЗ «Чибис-М», мав давач електричного поля з базою в 20 м [30]. Згідно з традиційними уявленнями, ШР обмежені висотами 50—70 км. Також вважалося, що КНЧ-випромінювання (50 і 60 Гц) від ліній електромереж не виходить за провідні шари верхньої атмосфери [18]. З цього мало б випливати, що ШР і перші гармоніки мережі не можуть спостерігатися низькоорбітальними супутниками Землі. Проте у пізніших роботах [11, 32] вказано, що проникання гармонік ШР в іоносферу все-таки можливе через їхнє неповне затухання, і вони можуть бути вимірянні при наявності на борту високочутливих давачів.

Зрозуміти механізм проникнення перших гармонік мережі надзвичайно важливо, оскільки це відкриває можливість створення системи моніторингу локальних засобів виробництва й споживання електроенергії в глобальному масштабі, у тому числі й прихованих.

Підсумовуючи, можна виділити такі особливості відображення в іоносфері гармонійного випромінювання електромереж.

1. Реєстрація високочастотних гармонік PLHR в іоносфері зустрічається досить рідко: за шість років роботи ШСЗ ДЕМЕТЕР виявлено лише 146 випадків.

2. В основному середня частота кластерів PLHR зосереджена в ділянці 2...2.5 кГц, хоча

спостерігались і частоти 1.5...14 кГц (поки що всього три реєстрації на борту ШСЗ «Січ-1М»).

3. Лінії у кластерах можуть бути віддалені одна від одної як на 50 (60) Гц, так і на 100 (120) Гц, при цьому їхня інтенсивність при віддаленні від середньої частоти спадає.

4. Спостерігається і пряме проходження сигналів з частотою 50 (60) Гц в іоносферу, при цьому їхня інтенсивність вища безпосередньо над джерелами сигналів (в даному випадку — високочастотними лініями).

5. Перша гармоніка частоти мережі надійно реєструється на всіх ділянках орбіти супутника, незалежно від часу (день/ніч), на відміну від шумівських резонансів.

ВИСНОВКИ

Розглянуті експериментальні факти повинні стимулювати дослідження взаємодії потужних ЕМ-полів, пов'язаних з постійним зростанням виробництва електроенергії та іншими відповідними техногенними чинниками, з плазмою навколоземного космічного простору і їхнього відповідного впливу на космічну погоду.

Наявні експериментальні дані, а також ряд теоретичних оцінок дозволяють з високою достовірністю стверджувати, що постійний супутниковий моніторинг іоносферних і магнітосферних техногенних ЕМ-збурень в КНЧ-діапазоні може стати ефективним засобом об'єктивної оцінки й прогнозу космічної погоди і рівня споживання електроенергії, його денних або сезонних змін. На підставі такого моніторингу (з відповідним вимірюванням ЕМ-полів техногенного походження і параметрів іоносферної/магнітосферної плазми) можна передбачити можливість постійного контролю споживання енергії як у локальному (у межах однієї країни або навіть одного потужного споживача), так і у глобальному масштабах.

Подальший розвиток такого моніторингу дозволить створити карту ЕМ-обстановки над кожною країною і здійснювати як контроль техногенного ЕМ-забруднення навколоземного простору, так і прогноз космічної погоди у локальному і глобальному масштабах. Можна припустити, що надалі стане можливою і локалізація прихованих потужних споживачів енергії.

Автори вдячні команді мікросупутника «Чибис-М» за сприяння в отриманні телеметричних даних.

Ця робота виконана при частковій підтримці контракту № 4-03/13 з ДКАУ і проекту SEAM № 607197 за програмою ЄС FP7.

1. *Владимирский Б. М.* Космическая погода — климат и социальные процессы // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2011. — **107**, № 1. — С. 189—209.
2. *Зелёный Л. М., Гуревич А. В., Климов С. И. и др.* Академический микроспутник ЧИБИС-М // Космич. исслед. — 2014. — **52**, № 1. — С. 1—13.
3. *Климов С. И., Вавилов Д. И., Готтлиб В. М. и др.* Исследование ионосферной электромагнитной активности на микроспутнике «Чибис-М» // Физика плазмы в Солнечной системе: Сб. тез. 8-й ежегод. конф. — М., 2013. — С. 61.
4. *Колосков А. В., Ямпольский Ю. М.* Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — **14**, № 4. — С. 367—376.
5. *Молчанов О. А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околосредней плазме. — М.: Наука, 1985. — 224 с.
6. *Парновский А. С., Ермолаев Ю. И., Жук И. Т.* Космическая погода - история исследования и прогнозирования // Космична наука і технологія. — 2010. — **16**, № 1. — С. 90—99.
7. *Barbé K., Pintelon R., Schoukens J.* Welch method revisited: nonparametric power spectrum estimation via circular overlap // IEEE Trans. Signal Process. — 2010. — **58**. — P. 553—565.
8. *Bothmer V., Daglis I. A.* Space weather. Physics and effects / Springer, Series: Springer Praxis Books. Subseries: Environmental Sciences. — 2007. — Vol. 38. — 438 p.
9. *Bullough K., Kaiser R.* Strangeways H. J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere // J. Atmos. and Terr. Phys. — 1985. — **47**, N 12. — P. 1211—1223.
10. *Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G.* Experiment VARIANT — first results from wave probe // Adv. Space Res. — 2009. — **43**, N 12. — P. 1904—1909.
11. *Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al.* Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2014. — **117**. — P. 81—87.
12. *Francisco C. M.* Connecting renewable power plant to the Brazilian transmission power system / The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program. — Washington, DC (USA). — 2012. — 37 p.

13. *Helliwell R. A., Katsurakis J. P., Bell T. F., Raghuram R.* VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation // *J. Geophys. Res.* — 1975. — **80**, N 31. — P. 4249—4258.
14. *Impacts of severe space weather on the electric grid* // Report JSR-11-320, November, 2011. — Virginia (USA): The MITRE Corporation, McLean, 2011. — 101 p.
15. *Journal of Space Weather and Space Climate*, Open access journal, EDP Sciences, <http://www.swsc-journal.org/>.
16. *Knipp D.* Understanding Space Weather and the Physics behind it. — McGraw-Hill, 2011. — 744 p.
17. *Lurette P., Park C. G., Helliwell R. A.* Longitudinal variations of very-low-frequency chorus activity in the magnetosphere: Evidence of excitation by electrical power transmission lines // *Geophys. Res. Lett.* — 1977. — **4**, N 7. — P. 275—278.
18. *Molchanov O. A., Hayakawa M., Rafalsky V. A.* Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere and magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 1691—1712.
19. *Moldwin M.* An Introduction to Space Weather. — New York: Cambridge Univ. Press, 2008. — 156 p.
20. *Nemec F., Parrot M., Santolik O.* Influence of power line harmonic radiation on the VLF wave activity in the upper ionosphere: Is it capable to trigger new emissions? // *J. Geophys. Res.* — 2010. — **115**. — P. A11301. — doi:10.1029/2010JA015718.
21. *Nemec F., Santolik O., Parrot M., Berthelier J. J.* Comparison of magnetospheric line radiation and power line harmonic radiation: A systematic survey using the DEMETER spacecraft // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**. — P. A04301.
22. *Nemec F., Santolik O., Parrot M., Bortnik J.* Power line harmonic radiation observed by satellite: Properties and propagation through the ionosphere // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**. — P. A08317.
23. *Park C. G.* VLF wave activity during a magnetic storm: A case study of the role of power line radiation // *J. Geophys. Res.* — 1977. — **82**, N 22. — P. 3251—3260.
24. *Parrot M.* World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // *Ann. Geophys.* — 1990. — **8**. — P. 135—145.
25. *Parrot M., Zaslavski Y.* Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere // *Surv. Geophys.* — 1996. — **17**, N 1. — P. 67—100.
26. *Power line radiation and its coupling to the ionosphere and magnetosphere* / Ed. H. Kikuchi. — Reidel, 1983. — 208 p.
27. Report of the Assessment Committee for the National Space Weather Program / Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. — MD (USA): Silver Spring, 2006. — 118 p.
28. *Rothkaehl H., Parrot M.* Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 2005. — **67**, N 8—9. — P. 821—828.
29. *Row R. V., Mentzoni M. H.* On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return // *Radio Sci.* — 1972. — **7**, N 11. — P. 1061—1066.
30. *Simões F., Pfaff R., Freudenreich H.* Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2011. — **38**. — P. L22101. — doi:10.1029/2011GL049668.
31. *Space Weather, Its impact on Earth and implication for business* / Lloyd's 360 Risk Insight report. — London, Great Britain, 2010. — 36 p.
32. *Surkov V. V., Nosikova N. S., Plyasov A. A., et al.* Penetration of Schumann resonances into the upper ionosphere // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 2013. — P. 65—74. — doi: 10.1016/j.jastp.2013.02.015.

Стаття надійшла до редакції 10.10.14

Д. Ф. Дудкин, В. А. Проненко,
В. Е. Корепанов, С. І. Клімов

ИЗЛУЧЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Проведен анализ експериментально обнаруженого на нескольких спутниках явления излучения гармоник линий электропередач, которое наблюдается в ионосфере. Полученные данные дают основание настаивать на необходимости постоянного спутникового мониторинга ионосферных техногенных возмущений для объективного оценивания и прогноза космической погоды. Предполагается, что развитие мониторинга позволит создать карту электромагнитного загрязнения околоземного пространства в локальном и глобальном масштабах.

D. F. Dudkin, V. O. Pronenko,
V. Ye. Korepanov, S. I. Klimov

POWER LINE RADIATION IN THE NEAR-EARTH SPACE

We analyze the ionospheric phenomenon called as the power line harmonic radiation (PLHR) and observed onboard some low-Earth orbiting satellites. The obtained experimental data confirm the necessity of the permanent satellite monitoring of ionospheric technogenic perturbations for the objective estimation and prognosis of space weather. It is supposed that the further development of such a monitoring will allow one to create a map of electromagnetic contamination of near-Earth space both in local and global scales.