

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 16  
3 + 2010

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

## ЗМІСТ

*Карташев В. М., Кизим П. С., Ковтун В. Е., Стервоедов С. Н., Шматко Е. С.* Електронний избыток и эффект электромагнитной индукции широких атмосферных ливней

*Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф.* Ионосферные эффекты в течение полета ракеты «Протон»: результаты вертикального зондирования

*Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф.* Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты «Союз» в спокойных и магнитовозмущенных условиях

*Пишкало Н. И.* Прогноз максимума 24-го цикла солнечной активности

*Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М., Дугін С. С., Григоренко В. В.* Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю

*Жолобак Г. М.* Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України

*Сухов П. П., Волков С. К., Карпенко Г. Ф.* Использование широкопольных линзовых объективов для контроля космического пространства

## CONTENTS

3 *Kartashev V. M., Kizim P. S., Kovtun V. E., Stervoiedov S. N., Shmatko E. S.* Electron excess and electromagnetic induction effect of extensive air showers

15 *Zhivolup T. G., Chernogor L. F.* Ionospheric effects during rocket «Proton» flight: results of vertical sounding

22 *Zhivolup T. G., Chernogor L. F.* Ionospheric effects during flights of the rocket «Soyuz» under magnetically quiet and magnetically disturbed conditions

32 *Pishkalo M. I.* Prediction of the maximum of solar cycle 24

39 *Lyalko V. I., Shportjuk Z. M., Sakhatsky A. I., Sibirtseva O. N., Dugin S. S., Grigorenko V. V.* Comparison of satellite and ground-based hyperspectral data for the red edge position estimation

46 *Zholobak G. M.* Domestic experience of satellite monitoring over forest stands in Ukraine

55 *Sukhov P. P., Volkov S. K., Karpenko G. F.* The use of the wide-field lens optics for space surveillance systems

- Корепанов В., Марусенков А., Беляєв С., Клімов С., Зелений Л., Новіков Д., Ференц Ч., Ліхтенбергер Я., Боднар Л.* Хвильовий експеримент на мікросупутнику «Чібіс-М» **59** *Korepanov V., Marusenkov A., Belyayev S., Klimov S., Zelenyi L., Novikov D., Ferencz Cs., Lichtenberger J., Bodnar L.* Wave experiment onboard the microsatellite «Chibis-M»
- Панфилов И. П., Панфилов В. И., Соломко А. В., Михайловский В. Г.* Оценка эффективности поиска радиосигналов от корреспондентов с взаимно неизвестным расположением в космосе **68** *Panfilov I. P., Panfilov V. I., Solomko A. V., Mikhailovskii V. G.* The estimation of efficiency of the search for radio signals from correspondents with a mutually unknown location in space
- Ляденко А. Ф.* Вычисленные значения аномалии космических аппаратов «Пионер-10, 11» **74** *Liadenko A. F.* The calculated values for anomaly of the «Pioneer-10, 11» spacecrafts

## ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗИ

К 60-летию со дня рождения доктора физико-математических наук профессора Леонида Феокистовича Черногора

## НАШІ АВТОРИ

## FIGURES OF SPACE INDUSTRY

**77** 60th birthday of Professor L. F. Chernogor

## 79 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

---

Підписано до друку 16.06.10. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.  
Ум. друк. арк. 8,4. Обл.-вид. арк. 8,82. Тираж 150 прим. Зам. № 2717.

---

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 537.591.15

**В. М. Карташев, П. С. Кизим, В. Е. Ковтун, С. Н. Стервеедов, Е. С. Шматко**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## **ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗБЫТОК И ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ**

*Розраховано диференціальний та інтегральний спектри відносного надлишку електронів широкої атмосферної зливи. Методом математичного моделювання обчислювано магнітна індукція від цього електронного надлишку і вихідні імпульси електромагнітної індукції на клемах магнітного датчика із заданими параметрами. Показано, що вихідні імпульси мало чутливі до м'якої ( $\leq 4$  МеВ) частини енергетичного спектру електронів надлишку. Це відкриває перспективи для створення альтернативного методу детектування широких атмосферних злив, в якому не суттєва роль флуктуацій числа частинок малих енергій. Здобуто всі необхідні результати для планування пошукового експерименту.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) порождаются первичными космическими протонами или ядрами сверхвысокой энергии ( $E_0 > 10^{14}$  эВ) и являются единственным источником информации об их энергетическом спектре и ядерном составе. Они развиваются за счет двух одновременно идущих физических процессов: ядерно-каскадного и электронно-фотонного. Эффективное поперечное сечение столкновения при таких энергиях практически достигает предельного значения, поэтому средняя длина свободного пробега для протона в воздухе ограничена величиной  $80$  г/см<sup>2</sup>. Нуклоны, входящие в состав первичных космических ядер, сталкиваются с нуклонами ядер атомов воздуха независимо друг от друга, проходя в среднем ту же длину. Если ядро после таких столкновений сохраняется как целое, то его длина свободного пробега дополнительно усредняется по числу нуклонов, и разброс ее значений уменьшается. Столкновения нуклонов происходят неупруго, т. е. с рождением новых частиц (преимущественно равного числа  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^+$ -мезонов) и средним коэффициентом неупругости, равным  $0.5$ . Это означает, во-первых, что только половина энергии нуклона в среднем передается вторичным частицам, и во-вторых,

что нуклон сохраняется после взаимодействия, продолжая свое движение с оставшейся средней половиной энергии. В дальнейшем все повторяется, и нуклон, пройдя среднюю длину свободного пробега ( $80$  г/см<sup>2</sup>), снова рождает вторичные  $\pi$ -мезоны (пионы) со средней множественностью  $n_k \approx (0.5^k E_0)^{1/3}$ , где  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  [5]. Это и есть ядерно-каскадный процесс. Длина свободного пробега, коэффициент неупругости, а следовательно, и множественность пионов в каждом каскаде значительно флуктуируют, не говоря о случайных энергии и сорте первичного космического ядра. Поэтому средние величины применяются в оценочных расчетах, а в эксперименте требуется измерять реальные физические характеристики. Заряженные пионы либо ядерно взаимодействуют, проходя в среднем  $120$  г/см<sup>2</sup> и передавая всю свою энергию вторичным пионам, либо распадаются по схеме  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ ,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  со средним собственным временем жизни  $\tau_0 = 2.6033 \cdot 10^{-8}$  с. Нейтральные пионы быстро ( $\tau_0 = 8.4 \cdot 10^{-17}$  с) распадаются на два  $\gamma$ -кванта, образуя парциальные электронно-фотонные ливни. Таким образом, точка первого ядерного взаимодействия первичной космической частицы является началом ядерно-каскадного процесса и семейства парциальных электронно-фотонных ливней различных энергий. Оба процесса формируют релятивистски сжатый в продольном направлении

сгусток частиц, который практически со скоростью света в вакууме проходит сквозь атмосферу Земли. Полное число частиц в нем и их распределение в радиальном направлении непрерывно изменяется. Частицы из ядерно-каскадного процесса имеют узкое угловое распределение, поэтому сосредоточены вокруг оси ливня, ливневые электроны и позитроны (и  $\gamma$ -кванты) за счет многократного кулоновского рассеяния в воздухе отклоняются от нее в радиальном направлении на большие расстояния. Суперпозиция парциальных электронно-фотонных лавин на всех глубинах развития ШАЛ пополняется ядерно-каскадным процессом таким образом, что ее энергетическое и радиальное распределение на относительно малых расстояниях от оси по форме остаются неизменными и совпадающими с аналогичными распределениями для одиночного электронно-фотонного ливня в максимуме его развития [12]. Этот эмпирический факт облегчает проведение вычислений электронного избытка, давая возможность использования аналитических функций ливневой теории, полученных для «равновесного» (проинтегрированного по всем глубинам) энергетического спектра электронов, так как он, в свою очередь, пропорционален их спектру в максимуме развития ливня.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЛИВНЕВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ТАММА – БЕЛЕНЬКОГО

«Равновесный» нормированный к единице интегральный энергетический спектр ливневых электронов был опубликован Таммом и Беленьким в 1939 году [17]. Чтобы получить реальный спектр, необходимо умножить его на полное число частиц ливня  $E_0^*/E_{cr}$ , полученное Ландау в 1940 г. [9], где  $E_0^*$  — энергия первичного электрона или фотона, вызвавшего ливень,  $E_{cr}$  — критическая энергия. «Равновесный» нормированный интегральный энергетический спектр совпадает по форме со спектром в максимуме развития ливня, отличаясь от него только по величине:

$$\chi(\varepsilon) = 1 + \varepsilon e^\varepsilon \text{Ei}(-\varepsilon), \quad (1)$$

где  $\text{Ei}(-z) = -\int_z^\infty \frac{e^{-z'}}{z'} dz'$  — интегральная показат

ельная функция,  $z$  — действительная положительная величина,  $\varepsilon = 2.29E/E_{cr}$ ,  $E$  — кинетическая энергия электрона. В научной литературе встречается довольно грубая аппроксимация этого спектра [7]:

$$N(\geq \varepsilon) = \frac{N_{\max}}{1 + \varepsilon}.$$

Нормированный к единице аппроксимационный интегральный энергетический спектр  $N(\geq \varepsilon) = \frac{1}{1 + \varepsilon}$  совпадает со спектром Тамма – Беленького при  $\varepsilon = 0$  и при  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Их промежуточные значения дают расхождения в спектрах до 20 % (см. рис. 1). Тем не менее, в ряде случаев такая точность расчетов может быть достаточной, если они не направлены на изучение теории самих ливней. Смягчающим обстоятельством служит также логарифмическая расходимость дифференциального энергетического спектра ливневых электронов при малых энергиях вида  $(1 + 0.577\varepsilon + \varepsilon \ln \varepsilon + \dots)$ , что не позволяет надеяться на высокую точность теоретических спектров в области малых энергий, где их аппроксимация как раз ограничена. В подтверждение приводим дифференциальный энергетический спектр в максимуме развития ливня, полученный из аппроксимации интегрального энергетического спектра:

$$N_{\max}(E)dE \approx \frac{2.29}{E_{cr}} N_{\max} \frac{dE}{(1 + 2.29E/E_{cr})^2}. \quad (2)$$

В общем случае для любых глубин  $x$  развития ливня этот спектр трансформируется в зависимость от его возраста  $s$ :

$$N(E)dE \approx \frac{2.29}{E_{cr}} N(E_0^*, 0, x) \frac{s dE}{(1 + 2.29E/E_{cr})^{s+1}},$$

где

$$N(E_0^*, 0, x) \approx \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E_0^*/E_{cr})}} \exp \left[ \frac{x}{x_0} \left( 1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right]$$

— каскадная кривая,

$$s = \frac{3x}{x + 2x_0 \ln(E_0^*/E_{cr})},$$

$x_0$  — радиационная длина; число частиц в максимуме равно

$$N_{\max} = \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E_0^*/E_{cr})}} \frac{E_0^*}{E_{cr}}.$$

«Равновесный» энергетический спектр электронов обращает внимание еще на одну свою особенность. В нем велика доля частиц с энергией меньше критической (до 80 %). Средняя кинетическая энергия электронов в спектре [3] равна

$$\bar{E} = \frac{E_{cr}}{2.29} \left[ \ln \left( \frac{2.29 E_0^*}{E_{cr}} \right) - 0.42 \right],$$

или

$$\ln \bar{E} = \ln(0.245 E_{cr}).$$

Для воздуха она составляет примерно 20 МэВ.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЛИВНЕВЫХ ФОТОНОВ

Нахождение «равновесного» энергетического спектра ливневых фотонов базируется на соответствующем спектре электронов. Нормированным будет оставаться только электронный спектр, а фотонный спектр таковым уже не будет. Если интегральный энергетический спектр электронов есть  $\chi(\epsilon)$  (1), то аналогичный спектр фотонов будет иметь вид  $[1 - \chi(\epsilon)]/\epsilon$  при условии, что  $\epsilon_0 \gg \epsilon$ . Его необходимо умножить на  $E_0^*/E_{cr}$  и поделить на средний безразмерный коэффициент поглощения фотонов  $\mu_0$ , рассчитанный на одну радиационную длину. Для легких веществ  $\mu_0 = 0.7$ . На рис. 2 для сравнения показаны интегральные «равновесные» энергетические спектры ливневых электронов и фотонов. Видно, что фотонный спектр при малых энергиях логарифмически расходится. В максимуме развития ливня он может быть аппроксимирован достаточно простым выражением

$$N_\gamma(\geq \epsilon_\gamma) = \frac{N_{max}}{\mu_0} \cdot \frac{\epsilon_\gamma - \ln \epsilon_\gamma}{1 + \frac{2}{3} \epsilon_\gamma^2}. \quad (3)$$

Здесь  $\epsilon_\gamma = 2.29 E_\gamma / E_{cr}$ ,  $E_\gamma$  — энергия фотона. От интегрального энергетического спектра фотонов можно легко перейти к его дифференциальному спектру. Этот спектр имеет вид гиперболы и расходится при  $\epsilon_\gamma \rightarrow 0$ :

$$N_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma = \frac{2.29 N_{max}}{E_{cr} \mu_0} \times \frac{2\epsilon_\gamma^3 - 2\epsilon_\gamma^2 [2 \ln \epsilon_\gamma - 1] - 3\epsilon_\gamma + 3}{\epsilon_\gamma \left[ 1 + \frac{2}{3} \epsilon_\gamma^2 \right]^2} dE_\gamma. \quad (4)$$

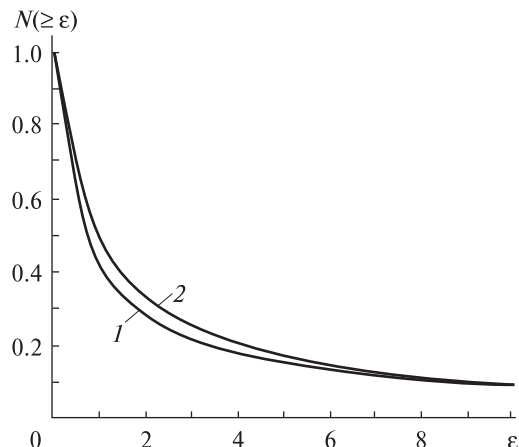


Рис. 1. «Равновесный» нормированный интегральный энергетический спектр ливневых электронов Тамма — Беленького (1) и его аппроксимация вида  $1/(1+\epsilon)$  (2)

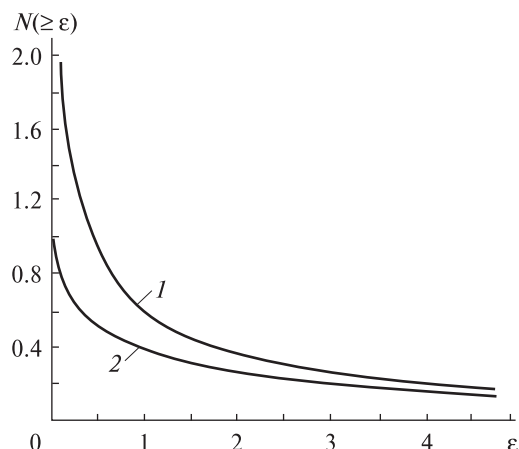


Рис. 2. «Равновесные» спектры фотонов (1) вида  $[1 - \chi(\epsilon)]/\epsilon$  и электронов (2) вида  $\chi(\epsilon)$

Для широких атмосферных ливней с энергией  $E_0 \geq 2 \cdot 10^{17}$  эВ полное число частиц  $N$  вблизи уровня моря будем вычислять путём преобразования эмпирической формулы, полученной в исследованиях на якутской установке [5]:

$$E_0 = (7.7 \pm 2.5) 10^{17} \left( \frac{N}{10^8} \right)^{0.86 \pm 0.06}, \quad (5)$$

где  $E_0$  — первичная энергия космической частицы в эВ, и подставлять его в формулы (2) и (4) вместо  $N_{max}$ .

## ИЗБЫТОК ЛИВНЕВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ АСКАРЬЯНА

В 1961 г. Г. Аскарьян показал [1], что электронно-фотонный ливень, развивающийся в воздухе, должен иметь интегральный избыток электронов над позитронами  $\left(\frac{N_- - N_+}{N_- + N_+}\right) \geq 0$ , и оценил его примерно в 10 %. Причины этого: 1) аннигиляция позитронов с электронами среды на лету; 2) рассеяние электронов и позитронов на электронах среды и образование  $\delta$ -электронов, которые движутся в составе ливня; 3) рассеяние ливневых фотонов на электронах среды и образование комптоновских электронов, которые также движутся в составе ливня. Как показали дальнейшие исследования, указанные процессы расположились в порядке увеличения вклада в суммарный избыток электронов. В настоящей работе дифференциальный энергетический спектр избытка электронов ШАЛ определяется численными методами путем интегрирования аналитических функций, описывающих перечисленные процессы. Используется приближение «тонкой мишени», т. е. учитываются только однократные столкновения ливневых электронов, позитронов и фотонов, и не учитываются кратные взаимодействия.

## ИЗБЫТОК ЛИВНЕВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ОБРАЗОВАННЫЙ АННИГИЛЯЦИЕЙ ПОЗИТРОНОВ НА ЛЕТУ

Аннигиляция ливневых позитронов на лету происходит как со связанными, так и со свободными электронами среды. Оставшиеся в избытке ливневые электроны имеют точно такой же энергетический спектр, как и поглощенные аннигиляцией позитроны. Полные эффективные поперечные сечения аннигиляции как функции энергии налетающих позитронов являются универсальными для любых сред и зависят только от числа электронов  $Z$ , содержащихся в нейтральном атоме [2]:

$$\sigma_{an1} = 4\pi Z^5 \alpha^4 r_0^2 \frac{1}{(\gamma_+ + 1)^2 \sqrt{\gamma_+^2 - 1}} \times$$

$$\times \left[ \gamma_+^2 + \frac{2}{3} \gamma_+ + \frac{4}{3} - \frac{\gamma_+ + 2}{\sqrt{\gamma_+^2 - 1}} \ln(\gamma_+ + \sqrt{\gamma_+^2 - 1}) \right], \quad (6)$$

$$\sigma_{an2} = \pi Z r_0^2 \frac{1}{\gamma_+ + 1} \times$$

$$\times \left[ \frac{\gamma_+^2 + 4\gamma_+ + 1}{\gamma_+^2 - 1} \ln(\gamma_+ + \sqrt{\gamma_+^2 - 1}) - \frac{\gamma_+ + 3}{\sqrt{\gamma_+^2 - 1}} \right]. \quad (7)$$

Здесь индексы «an1» и «an2» относятся к связанным и свободным электронам соответственно. Остальные обозначения:  $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры,  $r_0 = 2.8175 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона,  $\gamma_+ = (E_+ + mc^2)/mc^2$  — лоренц-фактор налетающего позитрона,  $mc^2 = 0.511$  МэВ — энергия покоя электрона (позитрона). Кинетическая пороговая энергия позитронов ( $E_+$ ) выбрана равной 150 кэВ.

Дифференциальный энергетический спектр электронного избытка, образовавшийся вследствие аннигиляции, записывается следующим образом:

$$N_{an}^{air}(E)dE = 0.5n_{air} \Delta x_{air} \{ \sigma_{an1}^{air}(E) + \sigma_{an2}^{air}(E) \} N(E)dE. \quad (8)$$

Здесь  $n_{air} = 5.0 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> — эффективная концентрация условных молекул воздуха на уровне моря;  $\Delta x_{air} = 0.12E / \{ \rho_{air} (dE/dx)_{tot} \}$  см — толщина слоя воздуха для однократных столкновений (1/5 средней длины свободного пробега позитрона относительно всех видов взаимодействий);  $\rho_{air} = 1.205 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> при нормальных условиях;  $Z_{air} = 7.233$  — эффективный порядковый номер условного атома воздуха;  $E_{cr} = 81$  МэВ;  $N$  определяется из (5) при выбранной энергии  $E_0$  первичной космической частицы.

## ИЗБЫТОК $\delta$ -ЭЛЕКТРОНОВ, ОБРАЗОВАННЫЙ РАССЕЯНИЕМ ЛИВНЕВЫХ ПОЗИТРОНОВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Рассматривается только рассеяние позитронов с кинетической энергией  $E_+ \geq 150$  кэВ. Причины этого следующие. При низких энергиях, в силу идентичности ливневых электронов и электронов среды, в ливне остается тот электрон, энергия которого после рассеяния выше. Такая ситуация не приводит к образованию электронного



избытка. Наоборот, рассеяние позитронов приводит к появлению в ливне электронов, которых до рассеяния не было, и к уходу из ливня рассеянного позитрона, что практически равносильно удвоению числа избыточных электронов. При высоких энергиях рассеяние и позитрона, и электрона сохраняет в составе ливня и налетающую, и рассеянную частицы. Поэтому можно ограничиться вычислением рассеяния электронов ливневыми позитронами, а результат удвоить.

Дифференциальное по энергии  $\delta$ -электронов сечение рассеяния позитронов представляется формулой [2]

$$\sigma_{\delta}(E_+, E)dE = \frac{2\pi r_0^2 Z}{mc^2(\gamma_+^2 - 1)} \times \left[ \left( \frac{mc^2 \gamma_+}{E} \right)^2 - \frac{2\gamma_+^2 + 4\gamma_+ + 1}{\gamma_+ + 1} \cdot \frac{mc^2}{E} + \frac{3\gamma_+^2 + 6\gamma_+ + 4}{(\gamma_+ + 1)^2} \right] - \frac{2\gamma_+}{(\gamma_+ + 1)^2} \cdot \frac{E}{mc^2} + \left( \frac{E}{mc^2(\gamma_+ + 1)} \right)^2 dE, \quad (9)$$

где  $\gamma_+ = (E_+ + mc^2)/(mc^2)$  — лоренц-фактор налетающего позитрона,  $E$  — кинетическая энергия  $\delta$ -электрона,

$$N_{\delta}^{air}(E)dE = 2 \cdot 0.5 n_{air} \left\{ \int_{E_+ = E}^{E_0} \sigma_{\delta}^{air}(E_+, E) \Delta x_{air} N(E_+) dE_+ \right\} dE.$$

Обозначения такие же, как в формулах (6)—(9).

### ИЗЫТОК КОМПТОНОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ОБРАЗОВАННЫЙ РАССЕЯНИЕМ ЛИВНЕВЫХ ФОТОНОВ НА ЭЛЕКТРОНАХ СРЕДЫ

Дифференциальное по энергии рассеянных электронов сечение комптоновского рассеяния на один атом выглядит следующим образом [2]:

$$\sigma_{comp}(E_{\gamma}, E)dE = \frac{\pi r_0^2 Z mc^2}{E_{\gamma}^2} \times \left[ \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma} - E} + \frac{E_{\gamma} - E}{E_{\gamma}} + \left( \frac{mc^2}{E_{\gamma} - E} - \frac{mc^2}{E_{\gamma}} \right)^2 - 2mc^2 \left( \frac{1}{E_{\gamma} - E} - \frac{1}{E_{\gamma}} \right) \right] dE.$$

Здесь  $E_{\gamma}$  — энергия ливневого фотона, МэВ.

Дифференциальный энергетический спектр избыточных комптоновских электронов в максимуме развития ливня вычисляется интегрированием по всем энергиям ливневых фотонов, превосходящим некую минимальную энергию  $E_{\gamma}^{\min}$ , которая является функцией энергии рассеянного электрона. Минимальная энергия комптоновского электрона  $E = 150$  кэВ.

$$N_{comp}^{air}(E)dE = n_{air} \left\{ \int_{E_{\gamma}^{\min}}^{E_0} \sigma_{comp}^{air}(E_{\gamma}, E) \Delta x_{air} N(E_{\gamma}) dE_{\gamma} \right\} dE.$$

Здесь  $E_{\gamma}^{\min} = 0.5(E + \sqrt{E^2 + 2mc^2 E})$ , МэВ;  $\Delta x_{air} = 0.2/\mu_{air}(E_{\gamma})$  см (1/5 средней длины свободного пробега фотона относительно всех видов взаимодействий),  $\mu_{air}(E_{\gamma})$  — линейный коэффициент ослабления интенсивности  $\gamma$ -излучения в воздухе. Все остальные обозначения сохранены.

### СУММАРНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ИЗЫТКА ЭЛЕКТРОНОВ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ

Дифференциальный энергетический спектр избыточных электронов, просуммированный по всем рассмотренным эффектам и нормированный на полное число частиц ШАЛ на уровне моря, имеет вид

$$F_{ex}(E)dE = \frac{N_{an}(E) + N_{\delta}(E) + N_{comp}(E)}{N} dE. \quad (10)$$

На рис. 3 показан спектр (10). Очевиден подавляющий вклад в избыток электронов комптоновского процесса, начиная с энергий 3 МэВ и выше, и подавляющий вклад рассеяний ливневых частиц с энергией менее 3 МэВ. Аннигиляция позитронов на лету в образовании избытка электронов ШАЛ несущественна.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

Широкий атмосферный ливень представляет собой релятивистски сжатый тонкий азимутально-симметричный диск из ядерно-активных частиц, релятивистских электронов, позитронов и  $\gamma$ -квантов, движущийся в среде практически со скоростью света в вакууме.

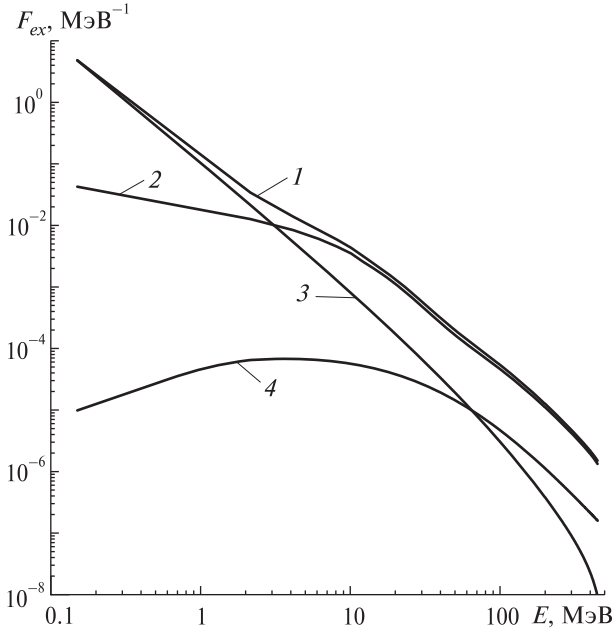


Рис. 3. Дифференциальный энергетический спектр относительного избытка электронов ШАЛ (1) и вклады комптон-эффекта (2), рассеяния электронов и позитронов на электронах среды (3), аннигиляции позитронов на лету (4)

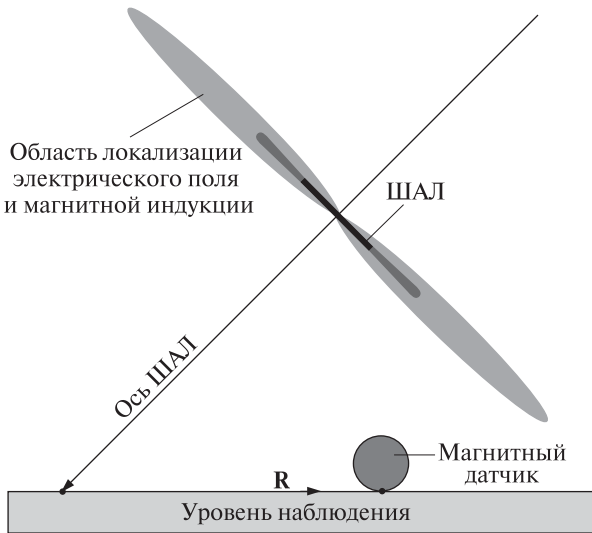


Рис. 4. Геометрическая схема релятивистского движения сгустка частиц, электрического поля и магнитной индукции ШАЛ

Радиальную зависимость числа электронов ШАЛ, отнесенного к единичной площадке, описывают аппроксимацией Грейзена [4] функции

Нишимуры и Каматы с видоизменениями Линсли [15]. Для ШАЛ с энергией выше  $5 \cdot 10^{18}$  эВ ( $N \geq 10^9$ )

$$\rho(r) = \frac{1.6}{2\pi r_m^2} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{-1} \left(1 + \frac{r}{r_m}\right)^{-2.6} N, \quad (11)$$

а радиус Мольера  $r_m = x_0 E_s / E_{cr} = 78.9$  м,  $E_s = 21$  МэВ. Предполагается, что электронный избыток распределен в ливне так же, как и все частицы. При меньших энергиях распределение (11) становится более пологим за счет уменьшения по абсолютной величине второго показателя степени, что обуславливается «старением» (т. е. увеличением эффективного возрастного параметра) ШАЛ. При этом первый показатель степени остается неизменным.

Продольный релятивистский ток избыточных электронов создает в воздухе на расстоянии  $R$  от оси ливня магнитную индукцию  $B(t, R)$ , которая является функцией общего для всех частиц текущего времени  $t$ :

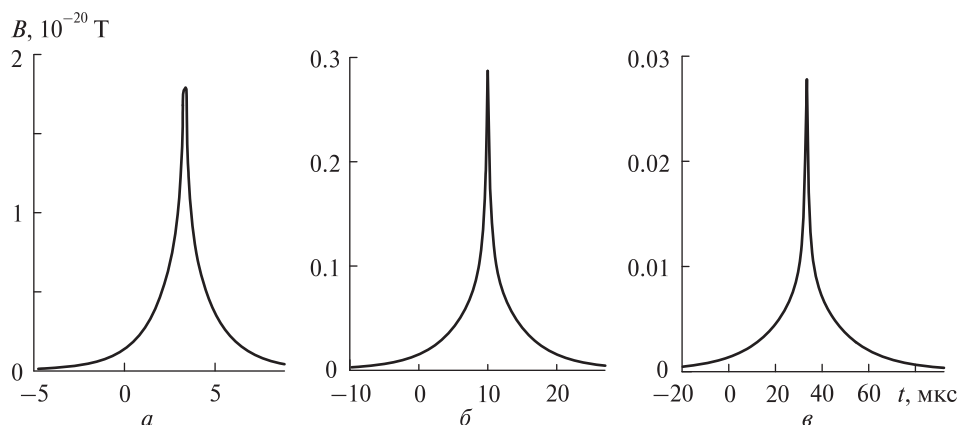
$$B(t, R) = 10^{-4} \mu \int_{E_{min}}^{E_0} dE \int_0^{\infty} r dr \int_0^{2\pi} F_{ex}(E) \rho(r) H(t, R) \cos \alpha d\varphi_r, \quad (12)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды, в которой измеряется магнитная индукция. Ниже будет показано, что  $\mu$  следует выбрать равной 1500. В подынтегральное выражение входят функции  $F_{ex}(E)$  и  $\rho(r)$ , которые уже описаны формулами (10), (11), а  $H(t, R)$  есть магнитное поле, создаваемое избыточным ливневым электроном в точке наблюдения [10]:

$$H(t, R) = \frac{e\beta(1-\beta^2)\sin\theta}{L^2(1-\beta^2\sin^2\theta)^{3/2}}. \quad (13)$$

Здесь  $e$  — заряд электрона,  $\beta$  — отношение скорости частицы в среде к скорости света в вакууме,  $L = \{(R^2 + r^2 - 2rR\cos\varphi_r + [\beta c(t - \tau)]^2)\}^{1/2}$  — расстояние от точки наблюдения до ливневого электрона в момент времени  $t$ ,  $\sin\theta = \sqrt{1 - \{\beta c(t - \tau)\}^2 / L^2}$ ,  $\theta$  — угол между направлением скорости частицы и направлением ее электрического поля,  $\tau = \frac{n}{c} \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR\cos\varphi_r}$  — время распространения в среде электрического и магнитного полей от





**Рис. 5.** Магнитная индукция  $B(t)$ , нормированная на одну частицу широкого атмосферного ливня, на расстоянии  $R = 1$  км (а), 3 км (б) и 10 км (в). Минимальная энергия электронов избытка  $E = 150$  кэВ;  $\mu = 1500$

ливневой частицы до точки наблюдения, совпавшей с плоскостью ливневого сгустка,  $\varphi_r$  — азимутальный угол радиуса-вектора  $\mathbf{r}$  электрона в ливневом диске,  $n$  — показатель преломления воздуха в области радиочастот во влажной атмосфере:  $n = 1.00034 \approx 1$ . Проектирующий косинус  $\cos\alpha = (R - r \cdot \cos\varphi_r)/L$ , в котором угол  $\alpha$  отсчитывается между вектором  $\mathbf{H}$  и направлением, перпендикулярным к оси ливня и радиусу-вектору  $\mathbf{R}$  точки наблюдения. Магнитное поле в (13) вычисляется в системе единиц СГСМ в гауссах. Коэффициент  $10^{-4}$  в (12) появляется при переходе к системе СИ. В средах с показателями преломления радиоволн  $n > 1$  магнитное поле запаздывает относительно частиц, его порождающих, поэтому движется за ливнем под соответствующим черенковским углом к его оси. В воздухе черенковский угол мал, поэтому запаздывание не учитывается. На рис. 4 показана наглядная упрощенная картина движения ШАЛ вместе с электрическим и магнитным полями электронного избытка.

На рис. 5 показаны результаты расчетов по формуле (12) магнитной индукции широких атмосферных ливней как функций времени и расстояния от их оси. Совершенно предсказуемо, что амплитуда импульсов магнитной индукции уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния (см. (13)), а их длительность при этом увеличивается.

### ДАТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

В качестве магнитоиндукционного датчика применяется один виток коаксиального кабеля в форме окружности. Для простоты площадь датчика  $S$  можно полагать равной  $1 \text{ м}^2$ . Внешний проводник кабеля следует посередине разрезать, чтобы избежать протекания по нему замкнутых электрических токов и компенсации токов внутреннего проводника. Он будет служить электрическим экраном для внутреннего проводника. Целесообразно использовать коаксиальный кабель с волновым сопротивлением  $\rho_0 = 75 \text{ Ом}$  в миниатюрном исполнении. Для усиления магнитной индукции ливня площадь витка следует заполнить высокочастотным термостабильным ферромагнитным материалом. До некоторой степени этим требованиям удовлетворяют магнитомягкие марганец-цинковые ферриты марки 1500МНЗ, относительная магнитная проницаемость которых,  $\mu = 1300 \dots 1700$ , не изменяется от 0 до 2 МГц. Миниатюрный кабель укладывается в канавку, расположенную в торце ферритовой пластины. Петля из коаксиального кабеля образует паразитный параллельный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi l \rho_0 C \sqrt{\mu}}, \quad (14)$$

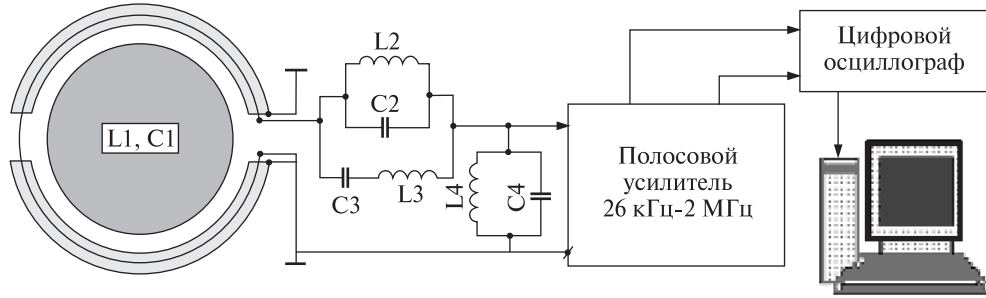


Рис. 6. Структурная схема регистрации магнитной индукции ШАЛ. Площадь датчика заполнена высокочастотным термостабильным ферритом с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 1500$

где  $l, \rho_0, C$  — соответственно длина, волновое сопротивление и погонная емкость отрезка кабеля. Для общепринятых коаксиальных кабелей  $\rho_0 C = 5 \cdot 10^{-9}$  Ом·Ф. Полагая в (14)  $l \approx 3.55$  м ( $S = 1$  м<sup>2</sup>),  $\mu = 1500$ , получим  $f_{res} = 2.3 \cdot 10^5$  Гц. Для расширения полосы пропускания датчика можно воспользоваться полосовым фильтром лестничного типа [11], входным звеном которого будет служить паразитный колебательный контур датчика. Один из вариантов датчика представлен на рис. 6. Параметры фильтра следующие:  $\rho_1 = \rho_0 \mu^{1/2} = 2.9$  кОм; нижняя частота среза  $f_{-1} = 26.4$  кГц, верхняя частота среза  $f_{+1} = 2.0$  МГц,  $C_1 = C_4 = 238$  пФ,  $L_1 = L_4 = 2$  мГн,  $C_2 = 358$  пФ,  $L_2 = 1.34$  мГн,  $C_3 = 35$  нФ,  $L_3 = 13.6$  мкГн. Мы детально рассчитывали и измеряли реальную частотную характеристику этого фильтра, но для упрощения дальнейших вычислений полагали ее идеальной.

### ПОТОК МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ЧЕРЕЗ ПЛОЩАДЬ ДАТЧИКА

Расположим датчик таким образом, чтобы он лежал в плоскости, образованной осью ШАЛ и радиусом-вектором  $\mathbf{R}$  точки наблюдения. Магнитный поток через площадь датчика не охватывает ее сразу, а движется по ней в продольном и радиальном направлениях. Поэтому он представляет собой свертку магнитной индукции и изменяющегося во времени элемента площади датчика:

$$\Phi(t, R) = \frac{2c^2}{n^2} \int_{t-t_0}^t B(t, R) \sqrt{\frac{nd}{c}(t-t') - (t-t')^2} dt',$$

где  $d = 2(S/\pi)^{1/2} = 2/\pi^{1/2}$  — диаметр датчика ( $S = 1$  м<sup>2</sup>),  $t' \leq t$ ,  $t_0 = (nd)/c$  — максимальное время движения магнитной индукции по площади датчика,  $n \approx 1$ . Магнитный поток ШАЛ (выраженный в веберах) на больших расстояниях от его оси  $\Phi(t, R) = B(t, R) \cdot S$ , так как в этом случае  $B(t, R)$  в пределах размера датчика практически не изменяется.

### МАГНИТОИНДУКЦИОННЫЕ ИМПУЛЬСЫ ЛИВНЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ДАТЧИКЕ НА ВХОДЕ И НА ВЫХОДЕ ФИЛЬТРА

Электродвижущая сила (ЭДС) электромагнитной индукции  $U_{in}(t, R)$  на входе в фильтр рассчитывается по формуле

$$U_{in}(t, R) = -\frac{d\Phi(t, R)}{dt}. \quad (15)$$

Магнитоиндукционный импульс на выходе датчика (см. рис. 7) есть результат вычисления свертки входного импульса и нормированной импульсной характеристики полосового фильтра  $h(t)$ :

$$U_{out}(t, R) = \int_0^t U_{in}(t', R) h(t-t') dt'. \quad (16)$$

Здесь

$$h(t) = \frac{\sin[\pi(f_{+1} - f_{-1})t]}{t} \cos[\pi(f_{+1} + f_{-1})t],$$

условие нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt = 1$$

и  $t' \leq t$ , так как сигнал на выходе не может опережать сигнал на входе фильтра.

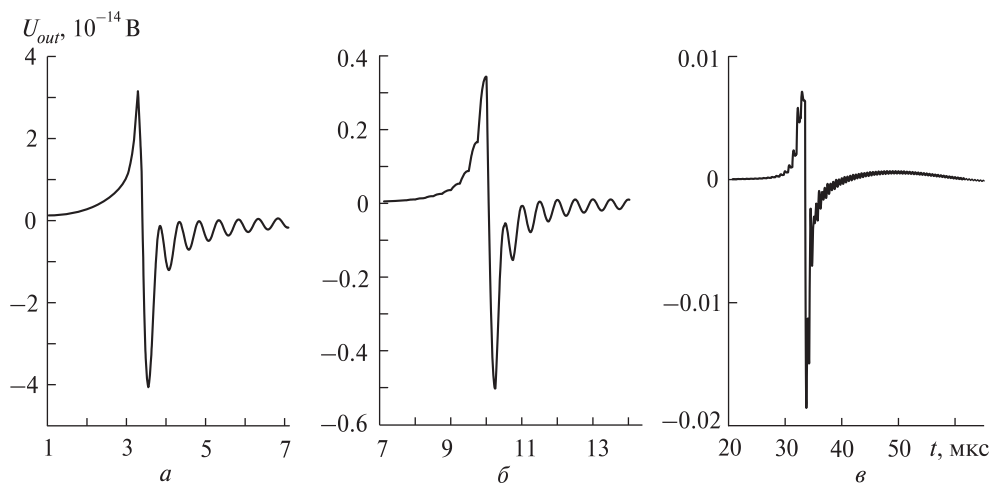


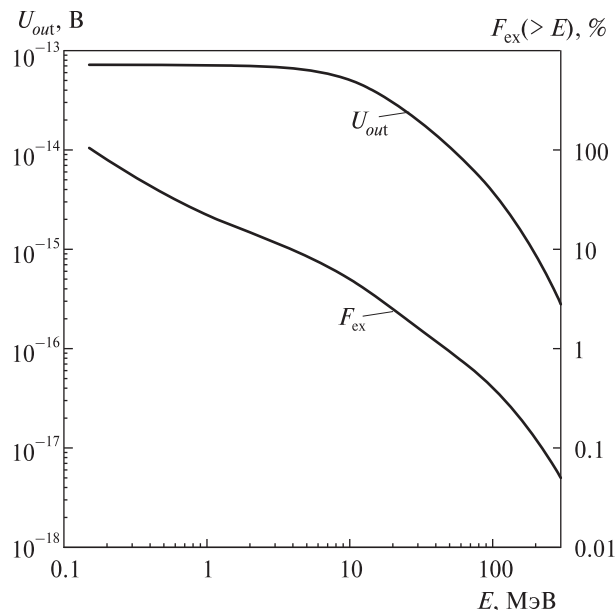
Рис. 7. Магнитоиндукционные импульсы, нормированные на одну частицу ШАЛ, на выходе магнитного датчика ( $\mu = 1500$ ). Расстояние точки наблюдения от оси ШАЛ  $R = 1$  км (а), 3 км (б) и 10 км (в). Минимальная энергия электронов избытка  $E = 150$  кэВ

Следует отметить, что описанный метод имеет ограничения на малых расстояниях, сравнимых с радиусом Мольер ШАЛ и меньше. В воздухе даже на уровне моря радиус Мольер велик ( $r_m = 78.9$  м), и на датчике, оказавшемся внутри ливня, будут когерентно суммироваться магнитные поля различного направления, в том числе и взаимно противоположного. Это приведет к искажению функции радиального распределения амплитуды выходного сигнала на малых расстояниях. Поэтому расстояния для регистрации ШАЛ, на которых магнитная индукция обратно пропорциональна их квадрату, вероятно,  $R > (3...5)r_m$ .

#### ВКЛАД ИЗБЫТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЙ В РЕГИСТРИРУЕМЫЙ ЭФФЕКТ НА ВЫХОДЕ МАГНИТНОГО ДАТЧИКА

Как выше было отмечено, расчет всех физических величин проводился для пороговой энергии избыточных электронов ШАЛ, равной 150 кэВ (рис. 3). Интегральный избыток при этой пороговой энергии достигает 100 %. Эффективное поперечное сечение комптон-эффекта при  $E_\gamma \rightarrow 0$  ограничено даже для истинно свободных электронов. В воздухе, где электроны связаны, фотоны ШАЛ низких энергий поглотятся в результате фотоэффекта. Поэтому увеличе-

ние электронного избытка за счет комптон-эффекта при низких энергиях будет ограничено. Суммарное эффективное поперечное сечение аннигиляции позитронов на связанных и на свободных электронах при низких энергиях также не увеличивается, а электронный избыток, порожденный этим процессом, незначителен в сравнении с двумя другими. Электрон-электронное и позитрон-электронное рассеяния не ограничены при низких энергиях ливневых частиц, поэтому их вклад в суммарный избыток при  $E \rightarrow 0$  будет увеличиваться. Соответственно будет увеличиваться значение и ширина углового распределения (см. рис. 4) магнитной индукции. При низких энергиях ливневых электронов флуктуации их числа должны быть велики. Следовательно, магнитная индукция также будет подвержена значительным флуктуациям. Этот вывод подвергает сомнению возможность использования магнитной индукции для регистрации и изучения ШАЛ. Но следует помнить, что в методе электромагнитной индукции играет роль не только величина магнитного потока, но и скорость его изменения (см. формулы (15), (16)). Поэтому итоговый результат показывает, что вклад избыточных электронов низких энергий в амплитуду выходных импульсов магнитного датчика весьма незначителен, и масштаб



**Рис. 8.** Интегральный энергетический спектр относительного избытка электронов  $F_{ex}(\geq E)$  и соответствующая зависимость амплитуды  $U_{out}(\geq E)$  выходного импульса электромагнитной индукции ШАЛ от пороговой энергии на клеммах магнитного датчика на расстоянии  $R = 1$  км. Амплитуда поделена на полное число частиц ШАЛ

указанных флуктуаций будет иметь допустимые для экспериментальной регистрации пределы. На рис. 8 описанная ситуация изображена графически.

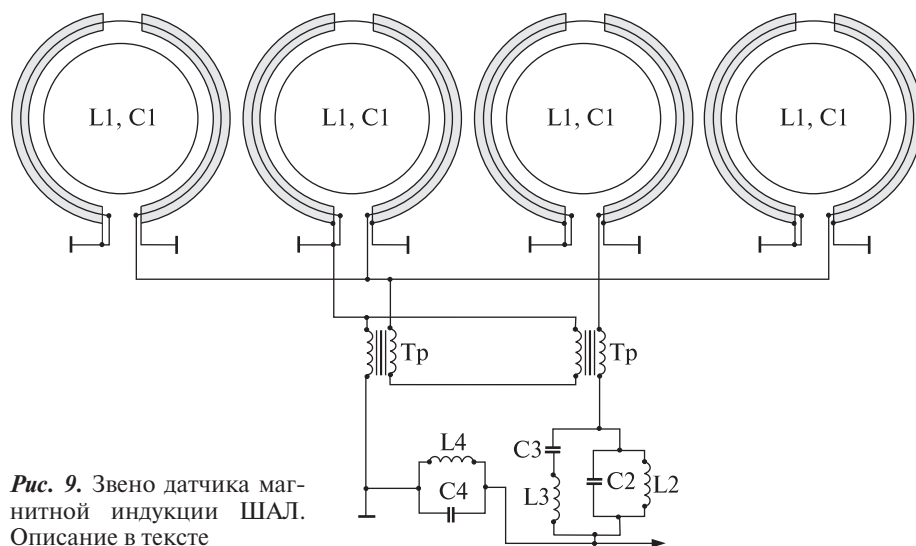
Очевидно, что реальный вклад в амплитуду выходного биполярного импульса магнитного датчика вносят избыточные электроны с энергией выше 4 МэВ, численность которых составляет 10 % от полного числа частиц ШАЛ. Избыток электронов с меньшими энергиями может достигать и 100 %, но реального вклада в эффект электромагнитной индукции они не добавляют.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы уже не раз возвращаются к эффекту электромагнитной индукции ливней в различных средах, в частности в воздухе, в галите и во льду. Первое упоминание этого эффекта в диссертации одного из авторов относится к 1978 г. Много позже был проведен более подробный расчет [13], но без конкретизации метода регистрации в реальном эксперименте. Позже стало ясно, что

только совместное моделирование физических процессов, происходящих в ливне и в регистрирующем эффекте датчика, позволяет получить результат, который необходим для планирования эксперимента [8, 6, 14]. В настоящее время основные свойства эффекта электромагнитной индукции ШАЛ достаточно изучены теоретически, так что планирование поискового эксперимента не будет вызывать много вопросов. Тем не менее, характеристики предлагаемого датчика не вполне соответствуют задаче регистрации. Краевые эффекты, порождающие неоднородность магнитного поля, потери в феррите, ограниченность частотной характеристики феррита по относительной магнитной проницаемости и его температурная нестабильность — основные недостатки магнитного датчика. Есть другое решение, в котором перечисленных недостатков нет. В качестве датчика служат 16 независимых витков добротного коаксиального кабеля. Витки находятся в параллельных плоскостях и соединены параллельно. Для обеспечения высокой чувствительности суммарная площадь витков должна составлять 1000...1600 м<sup>2</sup>. Поэтому такой датчик является весьма громоздким сооружением. Но это не является большим недостатком, так как широкий атмосферный ливень развивается в очень больших пространственных масштабах. Для определенности рассмотрим одно звено подобного датчика. Оно изображено на рис. 9.

Четыре независимых витка коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом в параллельных плоскостях (на общем каркасе) с площадью каждого 100 м<sup>2</sup> (длина одного витка — 35.5 м, диаметр — 11.3 м) соединяются параллельно с помощью двух трансформаторов Рутроффа [16]. Волновое сопротивление трансформаторов — 37.5 Ом, их входы соединяются параллельно, выходы — последовательно, поэтому на выходе звена восстанавливается волновое сопротивление 75 Ом. Далее четыре подобных звена с помощью двух трансформаторов Рутроффа снова соединяются параллельно. Паразитная резонансная частота параллельно соединенных витков не изменяется и составляет примерно 900 кГц. Полосовой фильтр для расширения полосы пропускания датчика будет стоять на выходе всей



**Рис. 9.** Звено датчика магнитной индукции ШАЛ. Описание в тексте

системы из 16 параллельно соединенных витков, которая тоже будет служить его входным звеном. Полоса пропускания датчика может быть расширена до 10 МГц: 80 кГц ... 10 МГц. Примерные параметры фильтра: волновое сопротивление — 75 Ом,  $C_1 = C_4 \approx 2.4$  нФ,  $L_1 = L_4 \approx 13.4$  мкГн,  $C_2 \approx 250$  пФ,  $L_2 \approx 126$  мкГн,  $C_3 \approx 0.335$  мкФ,  $L_3 \approx 0.18$  мкГн. Датчик будет иметь вид соленоида с 16 витками большого диаметра. Металлические экраны коаксиальных кабелей каждого витка должны быть разрезаны.

Какой бы датчик из двух представленных ни нашел применение в эксперименте, минимальное их число должно быть равно трем. Располагаться они должны в одном месте в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, чтобы суммарная амплитуда их выходных импульсов на расстоянии  $R_{\perp}$  от оси ШАЛ (в перпендикулярной плоскости) не зависела бы от направления его прихода:  $U_{out}(R_{\perp}) = \sqrt{(U_{out})_x^2 + (U_{out})_y^2 + (U_{out})_z^2}$ . В этом случае  $U_{out}(R_{\perp}) = \xi N / R_{\perp}^2$ , где  $\xi$  — размерный коэффициент пропорциональности, который должен быть определен заранее в расчетах и в предварительных экспериментальных исследованиях. Наличие двух таких систем датчиков, разнесенных друг от друга на достаточно большое расстояние (1...3 км), позволяет однозначно оценить  $R_{\perp}$  и полное число частиц  $N$ . Для этого,

помимо амплитуд  $U_{out}(R_{\perp 1})$ ,  $U_{out}(R_{\perp 2})$ , необходимо измерение относительного запаздывания сигналов  $\Delta t = (R_{\perp 1} - R_{\perp 2})/c$ . Оно осуществляется при помощи глобальной системы позиционирования GPS. Таким образом, альтернативный метод регистрации широких атмосферных ливней, не требующий очень большого числа детекторов, ждет своего экспериментального подтверждения.

1. Аскарьян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электронно-фотонного ливня и когерентное излучение от него // Журн. эксперим. и теор. физ. — 1961. — 41. — С. 616—618.
2. Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. — М.: Наука, 1969. — 624 с.
3. Бельский С. З. Лавинные процессы в космических лучах. — М., Л.: ГИТТЛ, 1948. — 244 с.
4. Грейзен К. Широкие атмосферные ливни // Физика космических лучей / Под ред. Дж. Вильсона. — М.: Изд-во иностр. лит., 1958. — Т. 3. — С. 7—141.
5. Дьяконов М. Н., Егоров Т. А., Ефимов Н. Н. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. — Новосибирск: Наука, 1991. — 251 с.
6. Залюбовский И. И., Карташев В. М., Ковтун В. Е. и др. Магнитоиндукционный эффект электронно-фотонных ливней, развивающихся в больших толщах льда // Радиофизика и радиоастрономия. — 2002. — 7, № 3. — С. 254—264.
7. Зацепин В. И., Чудаков А. Е. Пространственное распределение интенсивности черенковского света от широких атмосферных ливней // Журн. эксперим. и теор. физ. — 1962. — 42. — С. 1622—1628.



8. *Карташев В. М., Ковтун В. Е., Шматко В. Е.* Магнитоиндукционный метод детектирования широких атмосферных ливней предельно высоких энергий // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — **4**, № 1. — С. 61—68.
9. *Ландау Л. Д.* Угловое распределение частиц в ливнях // Журн. эксперим. и теор. физ. — 1940. — **10**. — С. 1007.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — М.: Наука, 1988. — 510 с.
11. *Сахарова Т. М.* Расчет частотных характеристик рабочего затухания электрических фильтров. — М.: Связь, 1968. — 327 с.
12. *Христиансен Г. Б., Куликов Г. В., Фомин Ю. А.* Космическое излучение сверхвысоких энергий. — М.: Атомиздат, 1975. — 256 с.
13. *Шматко Е. С., Молотко С.П., Карташев В.М. и др.* Индукционный эффект широких атмосферных ливней // Пробл. ядер. физ. и космич. лучей. — 1988. — № 30. — С. 3—11.
14. *Kartashev V. M., Kovtun V. E., Minko O. K., et al.* Possibility to detect cosmic particles and neutrino of super-high energies in atmospheric air and condensed media using magnetoinductive method // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Ядра, частинки, поля. — 2004. — Вип. 2 (24). — № 628. — С. 23—34.
15. *Linsley J.* Primary cosmic rays of energy  $10^{17}$  to  $10^{20}$  eV, the energy spectrum and arrival directions // Proc. 8<sup>th</sup> Int. Cosmic Rays Conf. Jaipur. — 1963. — V. 4. — P. 77—99.
16. *Ruthroff C. L.* Some broad-band transformers // Proc. IRE. — 1959. — **47**. — P. 1337—1342.
17. *Tamm I., Belenky S.* On the soft component of cosmic rays at sea level // J. Phys. USSR. — 1939. — **1**. — P. 177—198.

Надійшла до редакції 26.11.09

*V. M. Kartashev, P. S. Kizim, V. E. Kovtun,  
S. N. Stervoiedov, E. S. Shmatko*

#### ELECTRON EXCESS AND ELECTROMAGNETIC INDUCTION EFFECT OF EXTENSIVE AIR SHOWERS

A differential and integral relative electron excess spectra of an extensive air shower are calculated. Using the mathematical simulation, the magnetic induction from this electron excess and electromagnetic induction output pulses on the contacts of the magnetic sensor with defined parameters are calculated. It is shown that output pulses have a little sensitivity to the soft part ( $\leq 4$  MeV) of the energy excess electron spectra. This opens up possibilities for the development of an alternative method for the extensive air shower detection where the role of the amount fluctuation of low energy particles is very small. All the necessary results for the planning of a research experiment are obtained.



УДК 550.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86, 550.388

Т. Г. Живолуп<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕЧЕНИЕ ПОЛЕТА РАКЕТЫ «ПРОТОН»: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

---

*Представлено результати спостережень за збуреннями в іоносфері, що виникали під час старту та польоту ракети «Протон». Старт з космодрому Байконур мав місце в 22:31 UT 29 березня 2005 р. Ракета стартувала у період помірної магнітної бурі ( $K_{pmax} = 4$ ). Збурення від ракети і магнітної бурі наклалися. Зі стартом пов'язані збурення, що виникли в іоносфері із запізненнями 11...26 і 87...102 хв. Їм відповідали швидкості 1.5...3.5 км/с і 375...440 м/с. Такі швидкості мають повільні МГД- або магнітоградієнтні хвилі та внутрішні гравітаційні хвилі. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів становила 2.5...5 %, період — 90 хв.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Эффекты в ионосфере, возникающие при стартах и полетах мощных ракет с работающими двигателями, изучаются около 40 лет [10, 11]. При этом установлено, что эффекты отличаются многообразием, существенно зависят от состояния космической погоды, удаления от космодрома, типа ракеты и других факторов. Строго говоря, нет двух одинаковых реакций на старт двух одинаковых ракет. Поэтому исследование реакции среды на старты и полеты ракет остается актуальной задачей.

Особое место в этих исследованиях занимает изучение крупномасштабных и глобальных возмущений. Их характерные размеры составляют около 1000 и 10000 км соответственно. Техногенные возмущения от ракет, охватывая большую часть атмосферы и геокосмоса, способны заметно влиять на характеристики радиосигналов почти всех диапазонов радиоволн. В этом заключаются их практический и экологический аспекты.

Кроме того, исследование возмущений, вызываемых стартами и полетами ракет, имеет и общенаучный аспект. Изучение возмущений позволяет лучше понять динамику физических процессов в атмосфере и геокосмосе, взаимо-

действие подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера [8, 9].

Для изучения эффектов стартов и полетов ракет применялись различные методы: доплеровского зондирования, вертикального и наклонного зондирования, некогерентного рассеяния, магнитометрический метод и другие [1—7, 10, 12]. В настоящей работе используется ионограммный метод, который ранее практически не использовался для изучения процессов в ионосфере, сопутствующих стартам и полетам ракет. Каждый метод диагностики ионосферы, основанный на определенном физическом явлении, открывает новые возможности в изучении особенностей возмущений той или иной природы.

При поиске эффектов стартов ракет, исследователи стремятся, как правило, вести измерения в условиях спокойной ионосферы, чтобы возмущения другой природы не накладывались на искомые эффекты. Мы усложним себе задачу и попытаемся выделить возмущения в ионосфере от стартующей ракеты на фоне возмущения естественной природы.

Целью настоящей работы является изложение результатов анализа ионограмм и состояния ионосферы накануне и после старта мощной ракеты. Важной особенностью этого старта было то, что запуск космического аппарата имел место на фоне главной фазы магнитной бури, что предо-

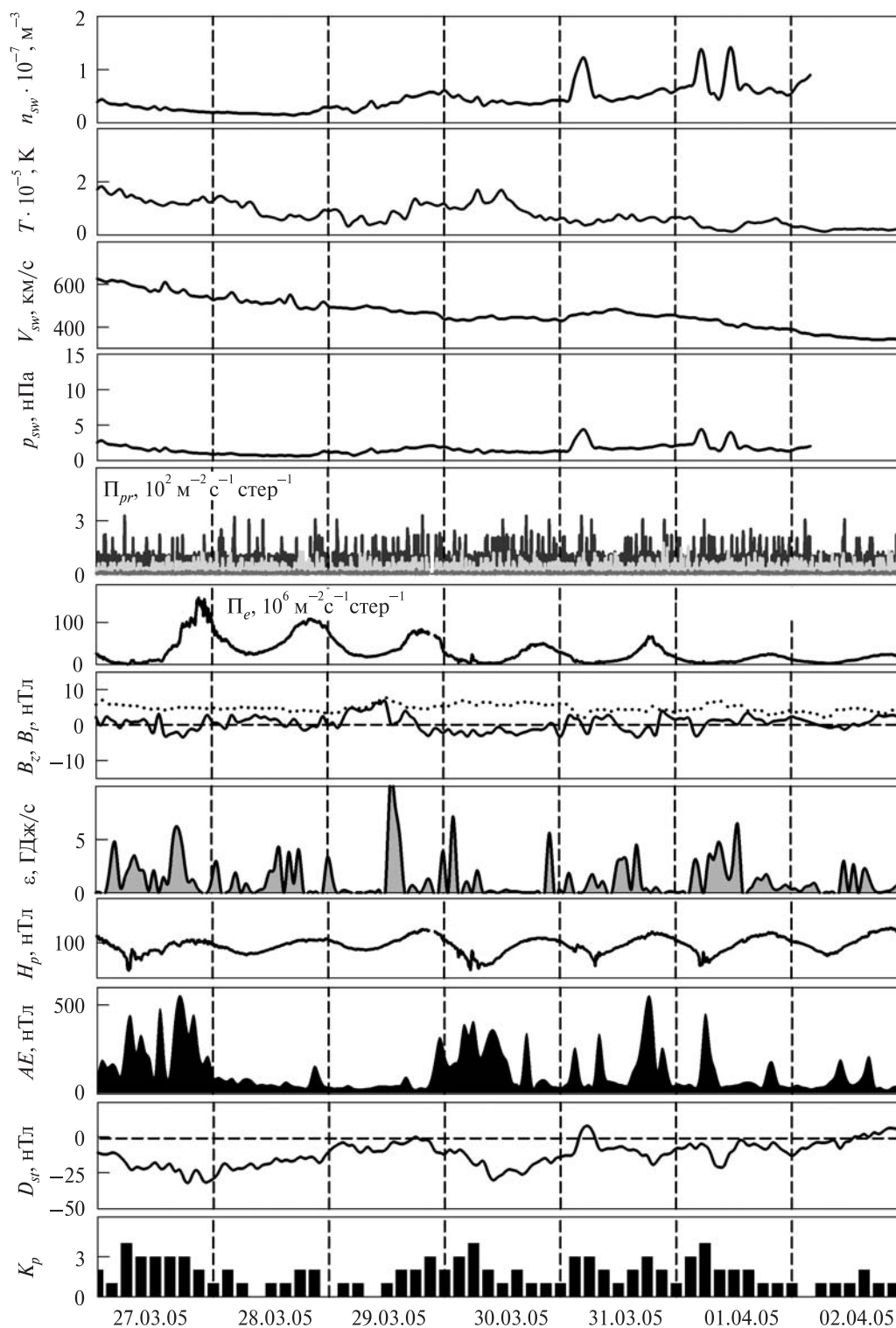


Рис. 1. Вариации параметров, описывающих состояние космической погоды с 27 марта по 2 апреля 2005 г. (см. текст)

пределило сложность селекции эффектов бури и полета ракеты.

Старт ракеты (СР) «Протон» с космодрома Байконур произошел 29 марта 2005 г. в 22:31 (здесь и далее время UT).

## СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В дни, предшествующие СР, состояние космической погоды было спокойным (рис. 1).

На рис. 1 (сверху вниз) приведены временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления  $p_{sw}$  (расчет); компонента  $B_z$ , модуля вектора  $B_l$  (точки) межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer); плотностей потоков протонов  $\Pi_{pr}$  (GOES-8 (W75) и электронов  $\Pi_e$  (GOES-12),  $\varepsilon$  — функции Акасофу (расчет);  $H_p$ -составляющей геомагнитного поля (GOES-12);  $AE$ -индекса авроральной активности (WDC Kyoto);  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University);  $K_p$ -индекса (Air Force Weather Agency).

Около 18:00 29 марта 2005 г. имело место внезапное начало магнитной бури, главная фаза которой продолжалась примерно с 21:00 29 марта до 04:00 31 марта. Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра соответственно от  $2 \cdot 10^6$  до  $6 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ , от  $5 \cdot 10^4$  до  $1.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ , от 0.1 до 0.2 нПа. Значения функции Акасофу увеличились до 10 ГДж/с. Составляющая  $B_z$  межпланетного магнитного поля стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала. Остальные параметры, описывающие космическую погоду ( $\Pi_{pr}$ ,  $\Pi_e$ ,  $B_l$  и  $H_p$ ) изменились незначительно.

Значения индексов были следующими:  $AE_{\max} \approx 300 \text{ нТл}$ ,  $D_{st \min} \approx -30 \text{ нТл}$ ,  $K_{p \max} = 4$ .

Старт ракеты пришелся на первые часы главной фазы магнитной бури. Учитывая, что согласно классификации [7, 8] эта буря относилась к весьма умеренным, можно надеяться, что она не повлияла существенно на состояние ионосферы. Это облегчило поиск и идентификацию эффектов, связанных с СР. Повторное возмущение космической погоды началось в ночь с 30 на 31 марта и продолжалось около двух суток.

В качестве фоновых выбраны сутки 28 марта. В ночь с 28 на 29 марта состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В частности, индекс  $K_p$  принимал значения 0 и 1 (см. рис. 1).

## ИСТОЧНИК ВОЗМУЩЕНИЙ И СРЕДСТВА ЗОНДИРОВАНИЯ

**Ракета «Протон».** В качестве источника возмущений в ионосфере рассматривался старт и полет ракеты «Протон». Эта ракета относится к самым тяжелым российским ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга — 8.84 МН, высота — 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка — около 20 т на высоте 200 км. Имеет четыре ступени, время работы которых составляет 124, 206, 238 и 600 с соответственно (всего около 20 мин).

**Ионозонд.** Наблюдение за состоянием ионосферы осуществлялось при помощи модифицированного ионозонда «Базис».

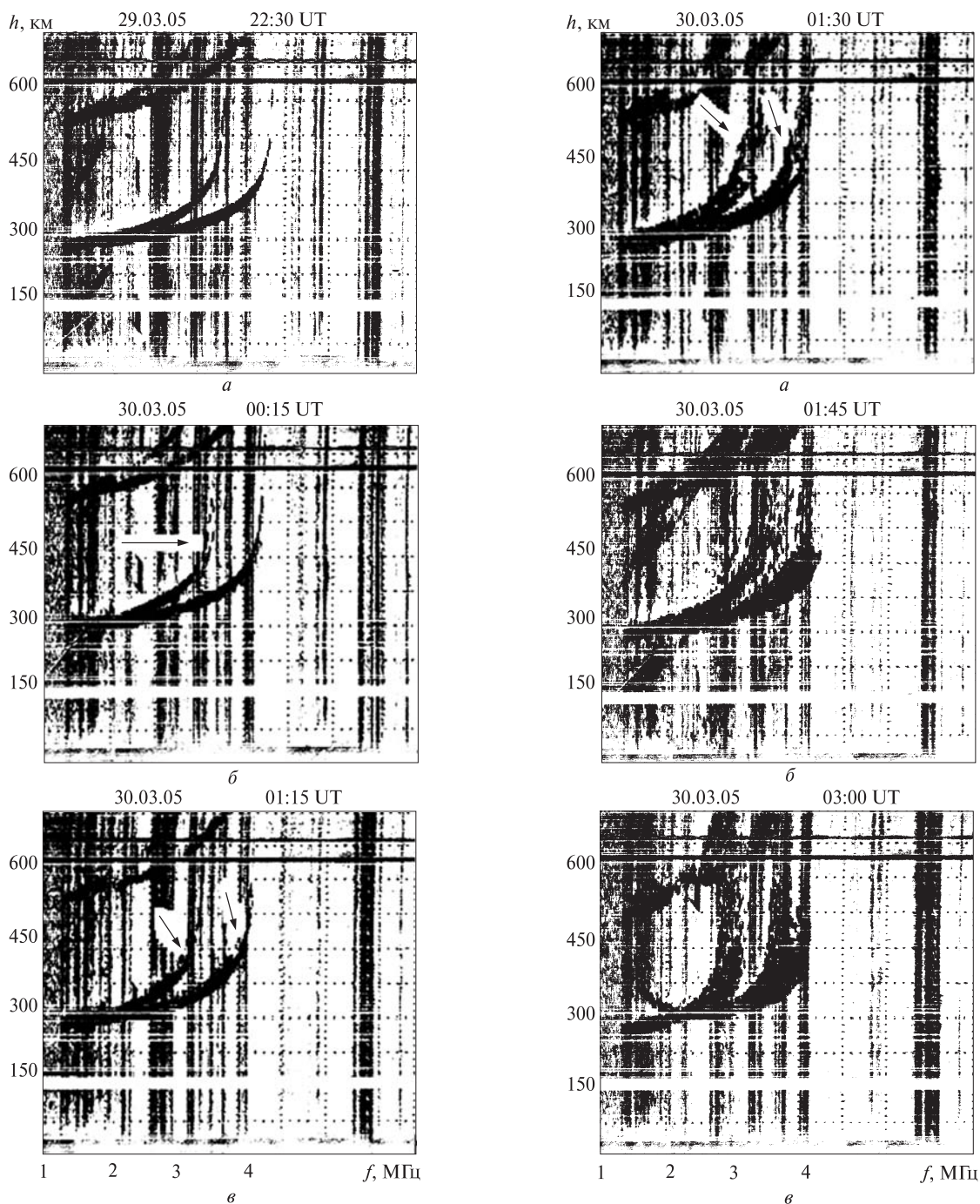
Ионозонд расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы ( $49^\circ 36'$  с. ш.,  $36^\circ 18'$  в. д.) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3...20 МГц, выходная мощность — 10 кВт, длительность излучаемых импульсов — 100 мкс, частота следования импульсов — 3.125...25 Гц. Ионограммы снимались с частотой 1 ионограмма в 15 мин.

Погрешность отсчета критических частот  $F$ -области ионосферы ( $f_{o,x} F2$ ) — 0.05 МГц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Анализ ионограмм.** Вид ионограммы в невозмущенных условиях накануне СР приведен на рис. 2, а. Видно, что четко наблюдается два следа, соответствующие обыкновенной ( $O$ ) и необыкновенной ( $X$ ) составляющим зондирующей волны. Первый след находится левее, второй — правее. Затухание зондирующей радиоволны в ионосфере было сравнительно небольшим, благодаря чему наблюдался «двукратный» сигнал, т. е. сигнал, отразившийся сначала от ионосферы, затем от поверхности Земли и снова от ионосферы.

Примерно через 90 мин после СР стали наблюдаться наклонные отражения  $O$ -, а потом и  $X$ -составляющей радиоволны. Как известно, по-



**Рис. 2.** Ионограммы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени: *а* — в 22:30 UT 29 марта (до СР), *б* — в 00:15 UT 30 марта (в момент прихода второго возмущения), *в* — в 01:15 UT 30 марта (в момент прихода третьего возмущения и возникновения диффузности). Здесь  $f$  — частота радиосигнала,  $h$  — действующая высота отражения сигнала. Стрелки указывают на появление наклонных отражений

**Рис. 3.** Ионограммы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени: *а* — в 01:30, *б* — в 01:45, *в* — в 03:00. Все ионограммы отражают процесс усиления диффузности. Стрелки указывают на появление наклонных отражений



явление наклонных отражений свидетельствует об отражении радиоволн от «взволнованной» поверхности. Длина волны плотности в ионосфере при этом составляет многие сотни — тысячи километров.

Ионограмма, полученная примерно через 105 мин после СР, показана на рис. 2, б. На ней также видны наклонные отражения  $O$ -составляющей радиоволны. Эти отражения приводят к раздвоению следа, которое четко наблюдалось в диапазоне частот 3.3...3.4 МГц.

На ионограмме, полученной в 00:45, т. е. через 135 мин после СР, наблюдался загиб левого конца следа  $X$ -составляющей, соответствующий частотам 1.55...1.8 МГц.

Ионограмма, зарегистрированная примерно через 165 мин после СР, приведена на рис. 2, в. На ней уже видны наклонные отражения  $O$ - и  $X$ -составляющих.

Еще через 15 мин, т. е. в 01:30, следы  $O$ - и  $X$ -составляющих заметно расширились, как и следы наклонных отражений (рис. 3, а). Определение критической частоты  $f_oF2$  стало затруднительным.

В 01:45 следы на ионограмме продолжали расширяться (рис. 3, б). Это же относится и к «двукратному» сигналу. Определение критической частоты  $f_oF2$  стало весьма сложным.

На ионограмме, зарегистрированной в 03:00, наблюдались еще более широкие следы. «Двукратный» сигнал при этом отмечался неуверенно. Вторично наблюдался загиб левого конца следа  $X$ -составляющей, соответствующий частотам 1.8...2.2 МГц.

**Анализ  $f$ -графиков.** Временные зависимости критических частот  $f_oF2(t)$  и  $f_xF2(t)$  показаны на рис. 4. Из рис. 4, а видно, что за сутки до СР в ночь с 28 на 29 марта 2005 г. значения  $f_oF2$  в интервале времени 21:00...01:00 изменялись незначительно. С 01:00 до 02:30 имело место уменьшение величины  $f_oF2$ , а затем ее увеличение. Это связано с предвосходными и восходными эффектами в ионосфере. В ночь с 29 на 30 марта 2005 г., т. е. в период СР, поведение  $f_oF2$  было иным. Непосредственно перед СР наблюдалось некоторое (примерно на 0.2 МГц) уменьшение  $f_oF2$ . Оно продолжалось и первые 15 мин после СР. Затем началось увеличение  $f_oF2$  от 3.75 до

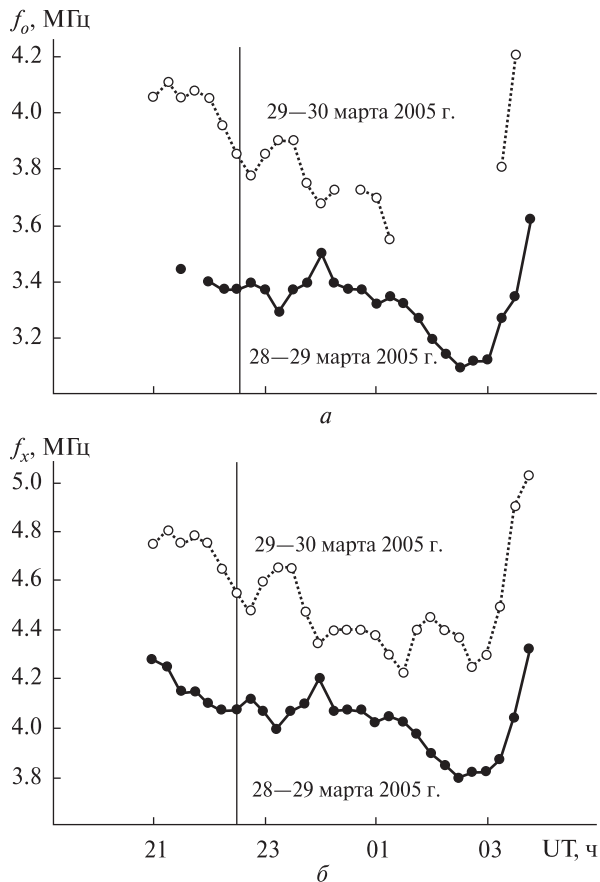


Рис. 4. Зависимость  $f_oF2$  (а) и  $f_xF2$  (б) от времени в фоновый период (точки) и в период СР (кружки). Вертикальной линией показан момент запуска ракеты

3.9 МГц. Увеличение продолжалось в течение 45 мин. После 23:30 оно сменилось непродолжительным (около 30 мин) уменьшением  $f_oF2$ . Далее в течение 30 мин наблюдалось уменьшение  $f_oF2$  от 3.9 до 3.7 МГц. За ним опять последовало увеличение  $f_oF2$  примерно на 0.05 МГц. Затем в течение 45 мин течение  $f_oF2$  оставалось почти неизменным, после этого наблюдалось уменьшение  $f_oF2$  на 0.15 МГц. Далее из-за диффузности следа для  $O$ -волны определение  $f_oF2$  в течение двух часов было невозможным.

Поведение  $f_xF2(t)$  в интервале времени 21:00...01:15 было примерно таким же, как и поведение  $f_oF2(t)$  (см. рис. 4, б). Определение  $f_xF2$  оказалось возможным и в интервале времени 01:15...03:15.

Вариации  $f_xF2(t)$  в контрольные сутки были почти такими же, как и вариации  $f_oF2(t)$ .

Таким образом, анализ  $f$ -графиков показал, что временные изменения  $f_{o,x} F2$  в контрольный интервал времени и в период СР существенно различались. Изменения во временном ходе наступали с запаздываниями 14...29, 90...105 и 180...195 мин (напомним, что ионограммы снимались через каждые 15 мин).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Не вызывает сомнений тот факт, что характер ионограмм и  $f$ -графики в контрольный интервал времени (за сутки до СР) и в период СР существенно различались. Но при этом было другим и состояние космической погоды, влияющей на состояние ионосферы. В ночь, когда произошел СР, наблюдалась весьма умеренная магнитная буря. Индекс  $AE$  и подвод энергии в магнитосферу в полярных областях (функция Акасофу  $\epsilon$ ) при этом увеличились в 5...7 раз (см. рис. 1).

Инжекция энергии приводит, в частности, к генерации в авроральных областях внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые распространяются к средним широтам. Время их распространения до широты, где находилось средство диагностики, составляло около 1...2 ч. Если генерация ВГВ произошла в интервале времени 23:00...24:00 29 марта, до широты наблюдения волна дошла в 00:00...02:00. Диффузность (уширение следов) началась в 1:30 и продолжалась, усиливаясь, около 2 ч. Как известно, причиной диффузности, называемой также  $F$ -рассеянием, является рассеяние зондирующей радиоволны достаточно мелкомасштабными неоднородностями концентрации электронов  $N$ . Причиной их появления служит плазменная турбулентность, которая усиливается в периоды магнитных бурь.

Квазипериодические вариации  $f_{o,x} F2$  вызываются прохождением ВГВ, которые модулируют  $N$ . Если эти вариации вызваны СР, по запаздыванию вариаций  $f_{o,x} F2$  можно определить время распространения возмущений.

Выше оценены времена запаздывания  $\Delta t$ . Они близки к 14...29, 90...165 и 180...195 мин. Точнее эти времена определить не удастся из-за низкой частоты регистрации ионограмм. Учитывая, что время движения ракеты «Протон» до области эффективной генерации ВГВ (около 120...130 км)

составляет примерно 3 мин, скорректированные запаздывания составляют около 11...26, 87...102 и 177...192 мин. Им соответствуют кажущиеся скорости распространения возмущений от места генерации до места регистрации волн (расстояние между ними около 2300 км), равные 1.5...3.5 км/с, 375...440 и 200...220 м/с.

Скорость  $v_1 = 1.5...3.5$  км/с (среднее значение  $v_1 \approx 2.5$  км/с) неоднократно нами наблюдалась при изучении эффектов СР доплеровским методом, методом некогерентного рассеяния, магнитометрическим методом (см., например, [10]). Эту скорость имеют медленные магнитогидродинамические волны, а также магнитоградиентные волны.

Скорость  $v_2 \approx 375...440$  м/с свойственна ВГВ. Эти волны наблюдались различными методами практически после каждого СР (см., например, [10, 11]). Разумеется, проявления возмущений в каждом из методов обладает своей спецификой. Поэтому привлечение различных методов позволяет лучше понять сложную и многообразную картину физических явлений, сопровождающих СР.

Добавим, что скорость 200...220 м/с не имеет самостоятельного значения. Она отражает факт периодичности ВГВ. Величина периода  $T$  при этом составляла около 90 мин, а длина волны — около 2000...2400 км. Такие периоды и длины волн, действительно, свойственны ВГВ.

Для исследования обсуждаемых эффектов, кроме ионозонда, использовался харьковский радар некогерентного рассеяния (НР) [1]. Целесообразно сравнить результаты, полученные при помощи двух независимых методов.

По данным метода НР примерно через  $\Delta t_1 \approx 20...30$  мин после СР произошло уменьшение  $N$  в диапазоне высот 260...320 км, которое затем сменилось ее увеличением. Максимальное значение  $N$  наблюдалось примерно через 60 мин после СР. Второй максимум в  $N$  начал проявляться через время  $\Delta t_2 \approx 100...110$  мин. Величина квазипериода составляла около 50 мин, а общая продолжительность возмущений — не менее 2.5 ч.

Скорректированные значения  $\Delta t_1 \approx 17...27$  мин,  $\Delta t_2 \approx 97...107$  мин. Им соответствовали  $v_1 = 1.4...2.3$  км/с и  $v_2 \approx 360...390$  м/с. Видно, что оба мето-



да для области высот вблизи максимума ионизации дают близкие результаты.

Полученные значения скоростей, периода колебаний и продолжительностей возмущений близки к тем, что наблюдались ранее как другими исследователями [11], так и нами [1–3, 6, 10]. Это обстоятельство позволяет с определенной степенью уверенности утверждать, что нами обнаружена реакция на СР «Протон». Особенностью этой реакции было то, что она проявлялась на фоне весьма умеренной магнитной бури.

## ВЫВОДЫ

1. Старт мощной ракеты «Протон» сопровождался возникновением в  $F$ -области ионосферы двух типов возмущений. Возмущения сопровождалось появлением наклонных отражений зондирующего сигнала, свидетельствующие о «взволнованности» области отражения радиоволны. Скорости распространения возмущений составляли 1.5...3.5 км/с и 375...440 м/с. Такие скорости свойственны медленным магнитогиродинамическим или магнитоградиентным волнам и ВГВ соответственно.

2. Период, длина волны и относительная амплитуда волновых возмущений концентрации электронов, связанных с ВГВ, составляли 90 мин, 2000...2400 км и 2.5...5 % соответственно.

3. Возникшая примерно через 3 ч после старта ракеты диффузность в  $F$ -области ионосферы, скорее всего, является результатом воздействия на ионосферу геокосмической бури.

1. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в  $F$ -области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2006. — **46**, № 6. — С. 783–800.
2. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствующие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2004. — **44**, № 4. — С. 518–534.
3. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в космической плазме, возмущенной высокоэнергетическими источниками // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 8. — С. 3–19.

4. Горельий С. И., Лампей В. К., Никольский А. В. Ионосферные эффекты стартов космических аппаратов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1994. — **4**, № 3. — С. 158–161.
5. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космические исследования. — 1980. — **18**, № 2. — С. 266–277.
6. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиопизика и радиоастрономия. — 1999. — **4**, № 3. — С. 227–246.
7. Нагорский П. М. Анализ отклика КВ-сигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // Изв. вузов. Радиофизика. — 1999. — **42**, № 1. — С. 36–44.
8. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59–106.
9. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
10. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. — 386 с.
11. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, Д. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000. — 640 с.
12. Mendillo M. The effects of rocket launches of the ionosphere // Adv. Space Res. — 1981. — **1**. — P. 275–290.

Надійшла до редакції 25.11.09

T. G. Zhivolup, L. F. Chernogor

## IONOSPHERIC EFFECTS DURING ROCKET «PROTON» FLIGHT: RESULTS OF VERTICAL SOUNDING

We present some results of observations of the ionosphere disturbances which arose during the launching site and flight of rocket the «Proton». The rocket was launched from the Baikonur site at 22:31 UT on 29 March 2005 during a moderate magnetic storm ( $K_{\text{max}} = 4$ ). Disturbances from the rocket were superimposed on disturbances caused by the magnetic storm. The disturbances which arose in the ionosphere with delays of 11–26 and 87–102 min were connected with the rocket launching. Velocities of 1.5–3.5 km/s and 375–440 m/s corresponded to these delays. Such velocities can be attributed to slow MHD or magneto-gradient waves and internal gravitational waves. The relative amplitude of disturbances of electron density and their period were equal to 2.5–5 % and 90 min, respectively.

УДК 550.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86, 550.388

Т. Г. Живолуп<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕЧЕНИЕ ПОЛЕТОВ РАКЕТЫ «СОЮЗ» В СПОКОЙНЫХ И МАГНИТОВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*Представлено результати спостережень за великомасштабними (~2000 км) збуреннями в іоносфері, що виникали під час старту та польоту ракет «Союз». Важливо, що одна із них стартувала у магнітоспокійний день, а інша — у магнітозбурений. Підтверджено, що навіть помірні магнітні бурі можуть сильно маскувати іоносферні ефекти стартів ракет. Знайдено часи запізнення та швидкості хвиль, що відповідають за перенесення збурень. Отримані результати узгоджуються з результатами наших попередніх досліджень.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные эффекты, возникающие при стартах ракет (СР), изучаются в течение примерно 40 лет [12, 13]. Первые наблюдения эффектов вблизи траектории ракеты выполнены еще в 1960-е гг. В работах [15, 17, 18, 25] показано, что при пролете ракеты образуются локальные ионосферные возмущения, в первую очередь уменьшение концентрации  $N$  электронов. В работах [19, 21] было получено, что возмущения могут быть достаточно крупномасштабными.

Результаты исследования эффектов уменьшения  $N$  в следе ракет обобщены в работе [20].

В работах [8, 14] показано, что во время стартов наряду с уменьшением  $N$  генерируются волновые процессы. Волны распространялись на расстояния в несколько тысяч километров. Обзор результатов изучения возмущений в ионосфере, примыкающих к траектории ракеты, выполнен в книгах [1, 13]. Подобные возмущения продолжали изучаться и в последнее время [1, 16]. Особый интерес представляют возмущения, способные распространяться на глобальные расстояния. Изложение результатов систематических исследований таких возмущений проведено в монографии [12]. Оказалось, что эффекты СР существенно зависят от состояния космической

погоды, от степени естественной возмущенности ионосферы.

Примеры поиска эффектов СР на фоне геокосмических бурь описаны в работах [3–6]. В них продемонстрировано, что взаимодействие подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера существенно осложняет выделение эффектов, связанных с СР.

В данной работе будет проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов при стартах двух одинаковых ракет, причем один из стартов имел место в спокойных условиях, а второй — в магнитовозмущенных. Чтобы убедиться в том, что эффект СР не полностью маскируется на фоне естественного возмущения, для анализа выбрано событие с умеренной магнитной бурей.

Старты ракеты «Союз» с космодрома Байконур прошли 28 апреля 2001 г. в 7:37 и 25 мая 2004 г. в 12:34 (здесь и далее время UT).

### СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Рассмотрим состояние космической погоды в период с 22 по 28 мая 2004 г. (рис. 1).

На рис. 1 (сверху вниз) приведены временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления  $p_{sw}$  (расчет); потоков протонов  $\Pi_{pr}$  (GOES-8 (W75) и электронов  $\Pi_e$  (GOES-12); компонен-

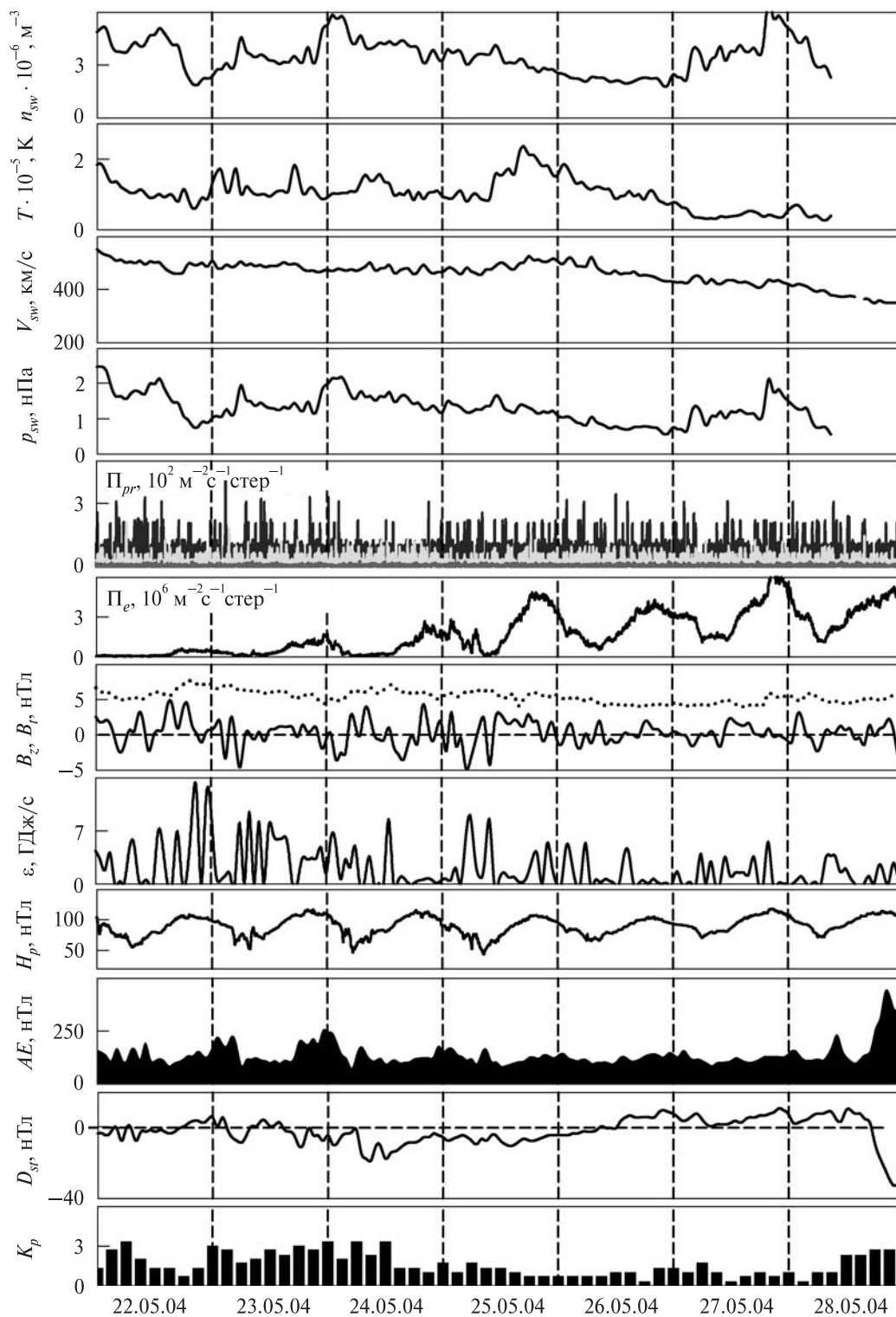


Рис. 1. Вариации параметров, описывающих состояние космической погоды с 22 по 28 мая 2004 г. (см. текст)

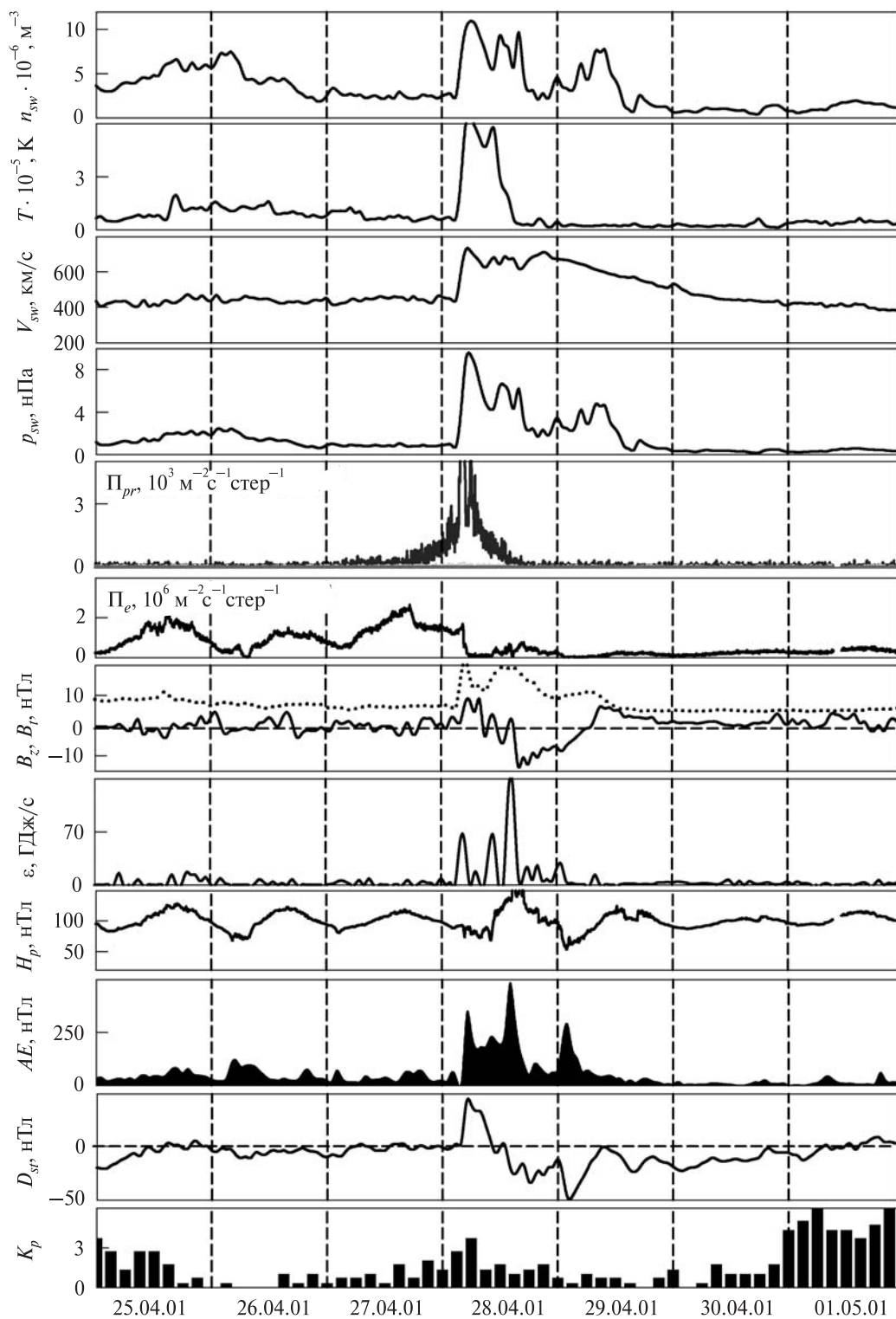


Рис. 2. Вариации параметров, описывающих состояние космической погоды с 25 апреля по 1 мая 2001 г. (см. текст)

та  $B_z$ , модуля вектора  $B_I$  (точки) межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer); функции Акасофу  $\varepsilon$  (расчет);  $H_p$ -компонента геомагнитного поля (GOES-12);  $AE$ -индекса авроральной активности (WDC Kyoto);  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University);  $K_p$ -индекса (Air Force Weather Agency).

Старту 25 мая 2004 г. предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс  $K_p$  изменялся от 1 до 3). Незначительными были вариации концентрации (от  $2 \cdot 10^6$  до  $6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ ), температуры (от  $10^5$  до  $2.4 \cdot 10^5 \text{ К}$ ), скорости (от 350 до 550 км/с), давления (от 1 до 2.5 нПа) солнечного ветра. Значения функции Акасофу изменялись от 1 до 14 ГДж/с.

Несущественными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов, напротив, постепенно нарастала по квазипериодическому закону с периодом около 1 сут. Составляющая  $B_z$  хаотически изменялась в пределах  $\pm 5$  нТл. Достаточно упорядоченными с периодом 1 сут были вариации  $H_p$ -компонента геомагнитного поля. Значения индекса  $D_{st}$  также хаотически флуктуировали в пределах  $\pm 10$  нТл. Вариации индекса  $AE$  были незначительными. Значения индекса  $K_p$  не превышали 3.

День старта 25 мая 2004 г. был спокойным. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных со СР.

В период, предшествующий старту 28 апреля 2001 г., состояние космической плазмы характеризовалось как невозмущенное (рис. 2). В день старта, 28 апреля 2001 г., примерно в 3:00 резко увеличились значения концентрации (в 4 раза), температуры (в 5–7 раз), скорости (в 1.5–1.8 раза), давления (в 10 раз) солнечного ветра. Скорость поступления энергии солнечного ветра увеличивалась до 70–140 ГДж/с. Внезапно началась весьма умеренная или умеренная (по классификации [9, 11]) магнитная буря. При этом

индекс  $D_{st}$  сначала увеличился до 45 нТл, а затем уменьшился до  $-50$  нТл — наступила главная фаза магнитной бури. Эта фаза продолжалась до начала следующих суток. Фаза восстановления заняла еще около двух суток. Главной фазе сопутствовало изменение знака составляющей  $B_z$  межпланетного магнитного поля, которое также продолжалось около суток. На регулярные вариации  $H_p(t)$  при этом наложился флуктуации.

Внезапное начало бури сопровождалось всплеском плотности протонов (примерно в 10 раз), которое продолжалось 15–20 ч. Плотность потока электронов, напротив, уменьшилась в несколько раз. Индекс авроральной активности в ходе магнитной бури увеличивался в 5–10 раз. В то же время индекс  $K_p$  28 апреля 2001 г. не превышал 4. Сильное увеличение индекса  $K_p$  без видимых причин наступило только 1 мая 2001 г. и продолжалось более суток.

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

В качестве источника возмущений в ионосфере рассматривался старт и полет ракеты «Союз». Российская ракета «Союз» относится к тяжелым ракетам. Она имеет полную массу 305 т, высоту 46.1 м, начальную тягу 4.14 МН, ее низкоорбитальная полезная нагрузка составляет 6855 кг для высоты 200 км. Параметры нулевой ступени следующие: масса  $4 \times 44.4$  т, тяга  $4 \times 1.02$  МН, диаметр 2.7 м, высота 19.6 м, время работы 120 с. Параметры первой ступени: масса 105.4 т, тяга 1 МН, диаметр 3 м, высота 27.8 м, время работы 286 с. Вторая ступень имеет следующие параметры: масса 25.2 т, тяга 0.3 МН, диаметр 2.7 м, высота 6.7 м, время работы 300 с. Общая продолжительность работы двигателей ракеты — около 12 мин.

Основные ориентировочные параметры ступеней ракеты «Союз» и ее траектории приведены в таблице.

Ориентировочные параметры ступеней ракеты «Союз» и ее траектории

Время полета, с	Масса топлива, т	Расход топлива, т/с	Энерговыделение, ТДж	Средняя мощность, ГВт	Высота, км	Дальность, км	Скорость, км/с
120	170	1.42	1.7	14.2	48	44	1.8
406	100	0.35	1	3.5	171	450	3.9
706	25	0.08	0.25	0.83	200	1680	7.7



Энерговыведение и мощность ступеней оценивались по формулам

$$E = qt, P = q\dot{m},$$

где  $m$  — масса топлива,  $q \approx 10^7$  Дж/кг — удельная теплотворная способность топлива,  $\dot{m}$  — расход топлива. Видно, что ракета достигает высот эффективной генерации возмущений ( $z \approx 120$  км [1]) при времени ее полета  $\Delta t_0 \approx 3$  мин. За это время ракета удаляется от космодрома на расстояние около 100—150 км.

Наблюдение за состоянием ионосферы осуществлялось при помощи модифицированного ионозонда «Базис».

Ионозонд расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36′ с. ш., 36°18′ в. д.) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3—20 МГц, его выходная мощность 10 кВт, длительность излучаемых импульсов — 100 мкс, частота следования импульсов 3.125—25 Гц. Ионограммы снимались один раз в 15 мин.

Погрешность отсчета критических частот  $F$ -области ионосферы ( $f_{o,x}F2$ ) — 0.05 МГц.

Временные зависимости  $f_oF2(t)$  подвергались спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП). В отличие от ОПФ предложенное одним из авторов АПФ обладает самоподобным базисом. Это при определенных условиях обеспечивает лучшую локализацию исследуемого волнового процесса [10]. Здесь, как и в работах [2, 10], при ВП использован вейвлет Морле.

Сначала из зависимости  $f_oF2(t)$  удалялся тренд  $\langle f_oF2(t) \rangle$ , вычисленный на интервале времени  $T_i = 195$  мин с шагом скольжения  $\Delta T_i = 15$  мин. Затем вычислялся временной ряд  $\Delta f_oF2(t) = f_oF2(t) - \langle f_oF2(t) \rangle$ , который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 180 мин. Кроме спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой среднее распределение энергии колебаний по периодам.

Необходимость применения системного спектрального анализа, использующего ОПФ, АПФ и ВП, обоснована в работах [2, 10]. Дело в том, что эти преобразования хорошо дополняют друг друга, компенсируя недостатки одного преоб-

разования достоинствами другого. Кроме того, при конечном времени обработки совместное применение этих преобразований позволяет получить с большей точностью данные о время-периодной локализации искомого волнового процесса на фоне шумов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Анализ ионограмм.** Опишем ионограмму, полученную 25 мая 2004 г. в 12:00, т. е. накануне СР. Четко наблюдались два следа, соответствующие обыкновенному (О) и необыкновенному (Х) компонентам зондирующей волны. Спорадический слой  $E_s$  на ионограмме не фиксировался. Затухание зондирующей радиоволны в ионосфере было сравнительно большим, из-за чего двукратно отраженный сигнал (сигнал, отразившийся сначала от ионосферы, затем от поверхности Земли и снова от ионосферы) наблюдался неуверенно.

Примерно через 11 мин после СР исчез след, соответствующий Х-компоненту радиоволны. Стал наблюдаться спорадический слой, а также два «многократных» сигнала, причем верхний — более отчетливо. На ионограмме, полученной в 13:00, т. е. через 26 мин после СР, регистрировались уже три «многократных» сигнала О- и Х-компонентов радиоволны, а также мощный  $E_s$  (с граничной частотой около 9 МГц) и его «многократный» сигнал. С 14:15 до 16:00 наблюдались четыре «многократных» сигнала О- и Х-компонентов радиоволны и «многократный» сигнал  $E_s$ .

Перейдем к описанию ионограммы, полученной 28 апреля 2001 г. в 07:00, т. е. до СР. Кроме двух следов, соответствующих О- и Х-компонентам зондирующей волны, видно отражение от спорадического слоя  $E_s$  с граничной частотой около 4 МГц. На ионограмме также четко наблюдается «двукратный» сигнал. На ионограмме, полученной в 07:45, т. е. через 8 мин после СР, «многократный» сигнал почти исчез, а граничная частота спорадического слоя увеличилась до 7 МГц. С 08:15 до 11:30 слой  $E_s$  на ионограммах не наблюдался. С 11:45 спорадический слой на ионограммах снова появился, и граничная частота его начала увеличиваться, достигнув максимума



7.8 МГц в 12:30. После этого граничная частота спорадического слоя стала уменьшаться.

**Анализ  $f_oF_2$ -графиков.** Зависимость критической частоты О-волны  $f_oF_2$  от времени для 25 мая 2004 г. приведена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что перед СР вариации  $f_oF_2$  были незначительными. Уже после 12:15 значения  $f_oF_2$  уменьшились на 0.6—0.8 МГц. Уменьшение продолжалось не менее 1 ч. После 13:15 началось увеличение  $f_oF_2$ . Максимальное значение этого параметра наблюдалось в 13:45, после чего имело место непродолжительное уменьшение  $f_oF_2$ , а затем — увеличение  $f_oF_2$  от 6.5 до 7.3 МГц.

В возмущенный день 28 апреля 2001 г. временные вариации  $f_oF_2$  были иными (рис. 4). Перед СР наблюдались вариации, не превышающие 0.8 МГц. После 07:30 началось стремительное увеличение  $f_oF_2$  от 10.6 до 13.3 МГц. В 08:30 зафиксировано максимальное значение этого параметра, равное 13.3 МГц. Далее примерно в течение 1.5 ч имело место уменьшение  $f_oF_2$  до 11.8 МГц. Затем наблюдалось непродолжительное увеличение  $f_oF_2$ , которое в 11:00 сменилось ее уменьшением от 12.3 до 10.7 МГц.

На описанные сравнительно медленные изменения  $f_oF_2$  25 мая 2004 г. и 28 апреля 2001 г. накладывались квазипериодические вариации  $\Delta f_oF_2$ . Их параметры оценены ниже.

Вариации  $\Delta f_oF_2$  и концентрации электронов  $\Delta N$ , как известно, связаны соотношением

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} \approx \frac{2\Delta f_oF_2}{f_oF_2}.$$

**Результаты спектрального анализа.** В магнитоспокойный день 25 мая 2004 г. перед СР имело место квазипериодическое колебание с квазипериодом  $T \approx 30$  мин  $\Delta f_oF_2 \approx 0.05 \dots 0.10$  МГц (рис. 5). Примерно через 26 мин после СР оно подавляется. В интервале времени 13:30—13:45 возникает новый квазипериодический процесс с  $T \approx 100 \dots 120$  мин и  $\Delta f_oF_2 \approx 0.10 \dots 0.15$  МГц. Его продолжительность — не менее 2—2.5 ч. При этом  $\delta_N \approx 3\text{—}5\%$ .

Результаты спектрального анализа для магнитовозмущенного дня 28 апреля 2001 г. приведен на рис. 6. Оказалось, что до СР в спектре  $\Delta f_oF_2$  преобладали колебания с  $T \approx 40 \dots 70$  мин, их амплитуда не превышала 0.2 МГц. После 08:40 ос-

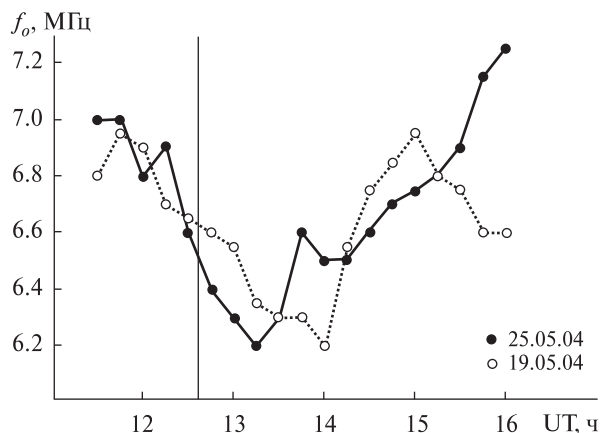


Рис. 3. Зависимость  $f_oF_2$  от времени в фоновый период 19 мая 2004 г. (кружки) и в период СР 25 мая 2004 г. (точки). Вертикальной стрелкой здесь и далее показан момент СР

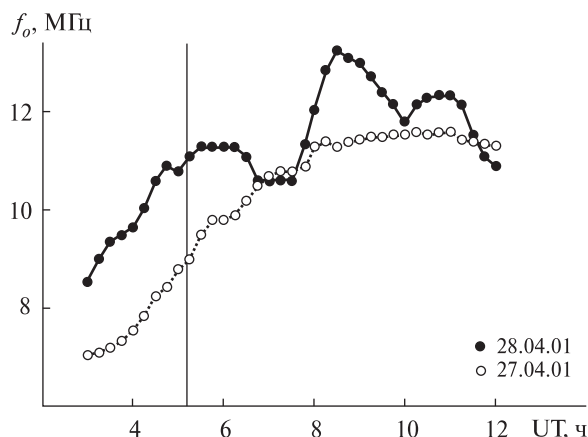
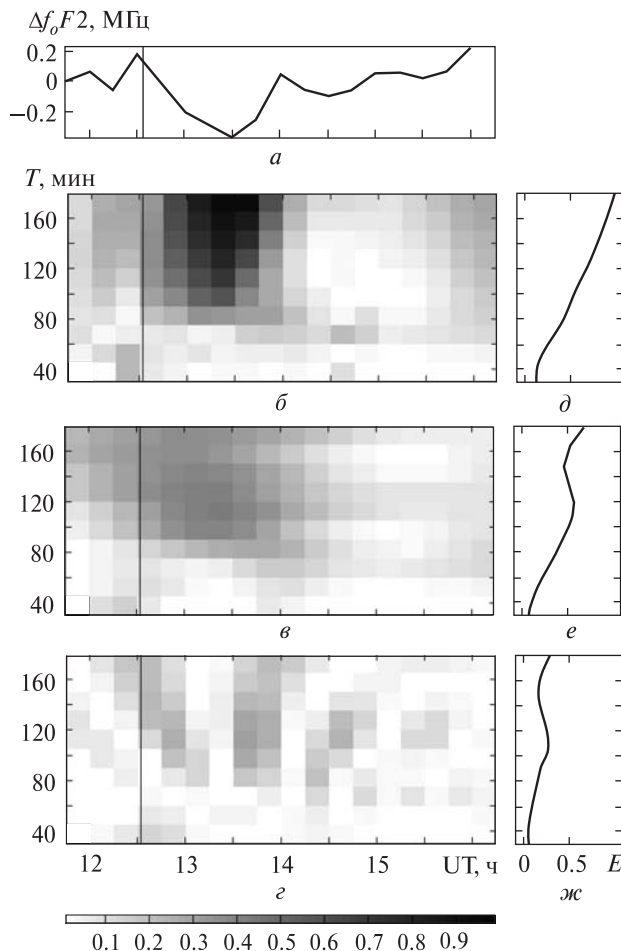


Рис. 4. Зависимость  $f_oF_2$  от времени в фоновый период 27 апреля 2001 г. (кружки) и в период СР 28 апреля 2001 г. (точки)

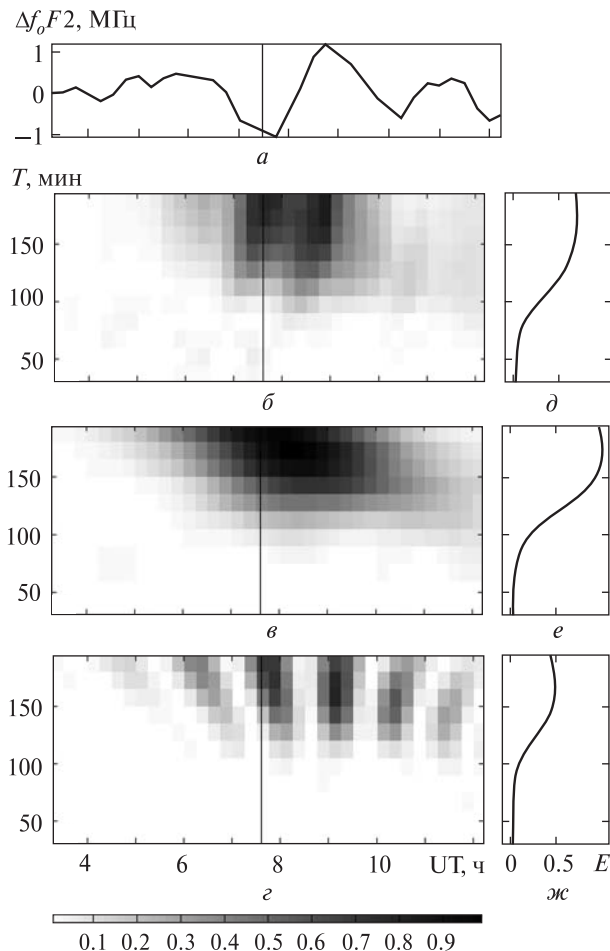
новым стало колебание с  $T \approx 150 \dots 180$  мин. Его амплитуда достигла 0.4 МГц. Указанным значениям  $\Delta f_oF_2$  соответствовали  $\delta_N$ , равные 3.5 и 7%. Добавим, что периоды основных колебаний лучше всего оценивать по максимумам в энергограммах.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Со стартом 25 мая 2004 г., по-видимому, связано уменьшение  $f_oF_2$ , которое наступило примерно через 26 мин после старта и наложилось на естественный ход  $f_oF_2$ . Скорее всего, пришла



**Рис. 5.** Результаты спектрального анализа вариаций  $\Delta f_0 F2(t)$  25 мая 2004 г.: *a* — исходная зависимость; *б, в, г* — спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; *д, е, ж* — энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30—180 мин. Интервал вычисления тренда составлял 195 мин



**Рис. 6.** Результаты спектрального анализа вариаций  $\Delta f_0 F2(t)$  28 апреля 2001 г.: *a* — исходная зависимость; *б, в, г* — спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; *д, е, ж* — энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30—180 мин. Интервал вычисления тренда составлял 195 мин

отрицательная полуволна возмущения, вызванного СР.

Учтем, что при дискретности временных отсчетов  $\tau = 15$  мин и равномерном законе  $p(t)$  распределения момента появления реакции на СР, средняя квадратичная ошибка определения задержки  $\Delta t$  реакции ионосферы составляет

$$\sigma_t = \frac{\tau}{\sqrt{12}} \approx 4.3 \text{ мин.} \quad (1)$$

Тогда  $\Delta t_1 \approx 26 \pm 4$  мин. Соотношение (1) легко получить из следующих элементарных вычисле-

ний. При

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau}, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases},$$

имеем

$$\bar{t} = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} tp(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} t dt = 0,$$

$$\bar{t^2} = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} t^2 p(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} t^2 dt = \frac{\tau^2}{12},$$

$$\sigma_i^2 = \overline{t^2} - \bar{t}^2 = \frac{\tau^2}{12}. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует выражение (1).

Следующее изменение во временной зависимости  $f_oF2(t)$  имело место в 13:30. При этом  $\Delta t_2 = 71 \pm 4$  мин. Время  $\Delta t_0$  движения ракеты «Союз» до области эффективной генерации ионосферных возмущений (высоты 120—130 км) составляет около 3 мин. Ракета при этом находится на расстоянии около 2300 км от места наблюдения. Тогда скорректированные задержки составляли  $23 \pm 4$  и  $68 \pm 4$  мин. Им соответствовали скорректированные скорости  $v_1' = 1.7 \pm 0.3$  км/с и  $v_2' = 560 \pm 30$  м/с.

Обсудим временные вариации  $f_oF2$  в магнитовозмущенный день 28 апреля 2001 г. Маловероятно, что резкое и значительное увеличение  $f_oF2$  в интервале времени с 07:30 до 08:30 вызвано только СР. При этом  $N$  увеличилась в 1.57 раза,  $\delta_N \approx 0.57$ . Скорее всего, сначала «провал», а затем «всплеск»  $f_oF2$  в интервале времени 06:15—07:45 и 07:45—10:00 вызваны ионосферной бурей, которая сопровождала описанную выше магнитную бурю. Хорошо известно, что в процессе геокоsmических бурь в высокоширотной области (широты 70...75°) генерируются перемещающиеся в сторону экватора атмосферные возмущения [22—24], которые вызывают перемещающиеся ионосферные возмущения. Их скорость распространения составляет от нескольких сотен метров до километра в секунду [1].

Рассмотрим подробнее первое (отрицательное) возмущение. Скорее всего, оно связано с резким увеличением индекса  $AE$ , которое имело место около 04:30—06:00. Примерно в то же время индекс  $D_{st}$  увеличился от 0 до максимального значения 45 нТл. Запаздывание первого возмущения составило 60—90 мин.

Интересно, что у второго (положительного) ионосферного возмущения передний фронт в 2.5 раза круче, чем задний. Такой эффект в нелинейной теории волн называется эффектом укрупнения [7]. Для его возникновения требуется выполнение двух условий: 1) чтобы волна была сильной ( $\delta_N \geq 0.2 \dots 0.3$ ); 2) чтобы волна прошла значительное расстояние. Первое условие выполняется, так как выше получена оценка  $\delta_N \approx$

$\approx 0.57$ . Проверим выполнение второго условия. Волна прошла расстояние от 70...75° до 50° с. ш., т. е. примерно 2200—2800 км. При запаздывании 1.5—3 ч ее скорость движения была близка к 220—440 м/с и при квазипериоде около 2 ч длина волны  $\lambda$  составляет 1600—3200 км. Видно, что  $\lambda$  одного порядка с  $R$ , т. е. нелинейные эффекты сполна могли проявиться.

Увеличение  $f_oF2$  в интервале времени 10:00—11:00, по-видимому, связано также с приходом возмущения из высоких широт. Также возмущения генерируются в период магнитных бурь, когда производная  $dD_{st}/dt$  достигает максимального значения [1]. Последнее имело место в 08:30—09:20. Примерно в этом же интервале времени имел место второй всплеск индекса  $AE$ . Тогда запаздывание возмущений составило 60—90 мин. При  $R = 2200 \dots 2800$  км имеем среднюю горизонтальную скорость распространения 410—780 м/с.

В чем же заключалась реакция ионосферы на СР? Скорее всего, она наложилась на возмущения, вызванные геокоsmической бурей. Не исключено также, что имело место синергетическое взаимодействие возмущений от бури и ракеты и их усиление. В частности, значения  $\delta_N$  достигли 7 %, а в магнитоспокойный день они не превышали 5 %.

Похоже, что времена запаздывания реакции на СР, определенные по изменению характера  $\Delta f_oF2$ , составили  $23 \pm 4$  и  $68 \pm 4$  мин. При этом  $\Delta t_1' = 20 \pm 4$  мин,  $\Delta t_2' = 65 \pm 4$  мин. Тогда  $v_1' = 2.0 \pm 0.4$  км/с,  $v_2' = 590 \pm 40$  м/с.

Таким образом, оцененные скорости распространения хорошо согласуются между собой, а также с результатами измерений, выполненных для этих же СР методом некогерентного рассеяния [3, 4]. Этим методом для F-области ионосферы получены следующие значения скоростей: 1.5 км/с и 550 м/с для 25 мая 2004 г. и 2 км/с и 610 м/с для 28 апреля 2001 г. Такие скорости имеют медленные МГД-волны и внутренние гравитационные волны [12].

## ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что реакция ионосферы на старты ракет существенно зависит от состояния

космической погоды. Не исключено, что эффекты ионосферных бурь могут синергетически взаимодействовать с эффектами стартов и полетов ракет, усиливая друг друга.

2. Как и следовало ожидать, эффекты ионосферных бурь существенно осложняют выделение эффектов стартов и полетов ракет.

3. Выявлены две группы возмущений, имевшие скорости распространения около 2 км/с и 600 м/с. Такие скорости, неоднократно наблюдаемые ранее, свойственны медленным МГД-волнам и внутренним гравитационным волнам соответственно.

4. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов достигала 5–7 %, а величина квазипериода — около 2–3 ч.

5. Обнаружены сильные ионосферные возмущения, имевшие место в течение геокосмической бури 28 апреля 2001 г. (с 07:30 до 11:30). Величина  $\delta_N$  достигала 0.57. Скорее всего, возмущения связаны с генерацией в высоких широтах и распространением к средним широтам перемещающихся ионосферных возмущений, на которые наложилось возмущение от ракеты.

Большая крутизна переднего фронта первого возмущения по сравнению с задним фронтом свидетельствует о нелинейном характере наблюдаемого ионосферного возмущения.

*Авторы благодарны В. П. Бурмаке за помощь в обработке результатов наблюдений.*

1. Афраймович Э. Я., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. — Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
2. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 11. — С. 3–24.
3. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — **14**, № 1. — С. 26–44.
4. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика параметров ионосферной плазмы вдали от траектории стартующих ракет // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2009. — **49**, № 5. — С. 667–682.
5. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1999. — **39**, № 1. — С. 72–78.
6. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты «Протон»: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 3. — С. 15–21.
7. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику. — М.: Наука, 1988. — 368 с.
8. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космические исследования. — 1980. — **18**, № 2. — С. 266–277.
9. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59–106.
10. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2008. — **48**, № 5. — С. 681–702.
11. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
12. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. — 386 с.
13. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, Д. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000. — 640 с.
14. Abdu M. A., Muralikrishna P., Batista I. S., Chaves A. H. P. On the rocket-induced wave disturbances in the daytime equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. — 1988. — **93**, N 4. — P. 2758–2760.
15. Booker H. G. A local reduction of F-region due to missile transit // J. Geophys. Res. — 1961. — **66**, N 4. — P. 1073–1081.
16. Drobzhev V. I., Gordienko G. I., Mukasheva S. N. Ionosphere disturbances during rocket launches at Baikonur (Kazakhstan) // Mathematics and Computers in Simulation. — 2004. — **67**, N 4–5. — P. 433–439.
17. Felker J. K., Roberts W. T. Ionospheric rarefaction following rocket transit // J. Geophys. Res. — 1966. — **71**, N 19. — P. 4692–4694.
18. Jackson J. E., Whale H. A., Bauer S. J. Local ionospheric disturbance created by a burning rocket // J. Geophys. Res. — 1962. — **67**, N 5. — P. 2059–2061.
19. Mendillo M., Hawkins G. S., Klobuchar J. A. A sudden vanishing of the ionospheric F-region due to launch of skylab // J. Geophys. Res. — 1975. — **80**, N 16. — P. 2217–2228.
20. Mendillo M. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiments // Adv. Space Res. — 1988. — **8**, N 1. — P. 51–62.

21. *Mendillo M.* The effect of rocket launches on the ionosphere // *Adv. Space Res.* — 1981. — **1**, N 2. — P. 275—290.
22. *Prolss G. W.* On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // *Ann. Geophys.* — 1993. — **11**. — P. 1.
23. *Prolss G. W.* Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes // *J. Geophys. Res.* — 1993. — **98**. — P. 5981.
24. *Prolss G. W.* Ionospheric F-region storms // *Handbook of atmospheric electrodynamics*, V. 2 / Ed. by H. Volland. — CRC, Boca Raton, Fla, 1995. — 195 p.
25. *Stone M. L., Bird L. E., Balsev M.* A Faraday rotation measurement on the ionospheric perturbation produced by a burning rocket // *J. Geophys. Res.* — 1964. — **69**, N 5. — P. 971—977.

*Надійшла до редакції 20.12.09*

*T. G. Zhivolup, L. F. Chernogor*

**IONOSPHERIC EFFECTS DURING FLIGHTS OF THE ROCKET «SOYUZ» UNDER MAGNETICALLY QUIET AND MAGNETICALLY DISTURBED CONDITIONS**

The results of observations of large-scale (about 2000 km) disturbances in the ionosphere which arose during launching and flight of rockets «Soyuz» are presented. It is important that one of the rockets was launched on magnetically quiet day and another rocket was launched on magnetically disturbed day. It is confirmed what even a moderate magnetic storm can strongly mask ionospheric effects of rocket launchings. We found delay times and speeds of waves which are responsible for carry of disturbances. Our results are in good agreement with results of our earlier researches.



УДК 523.9

**Н. И. Пишкало**

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

## **ПРОГНОЗ МАКСИМУМА 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

---

*Дано прогноз максимального числа Вольфа і епохи максимуму для 24-го циклу сонячної активності. Прогноз зроблено як на основі середніх характеристик сонячних циклів 1—23, так і на основі спостережених сонячних полярних магнітних полів та індексу стиснутості сонячної корони під час затемнень в епоху мінімуму активності. Очікується, що 24-й сонячний цикл досягне максимальної амплітуди  $88 \pm 17$  на початку 2014 р., а наступний мінімум припадатиме на першу половину 2020 р. Тривалість 24-го циклу становитиме приблизно 11,3 р.*

---

Наше Сонце являється типичной спокійной звездой; его светимость и размер не претерпевают существенных изменений со временем. В то же время магнитные свойства Солнца изменяются существенно, полярность его полярного магнитного поля изменяется с периодом 22 года, а многие явления в солнечной атмосфере имеют периодичность примерно 11 лет (половину магнитного периода). В этом смысле Солнце можно считать магнитопеременной звездой.

В 1843 г. Швабе на основании анализа 17-летних наблюдений обнаружил, что количество солнечных пятен изменяется с периодом около 10 лет. Чуть позже Вольф на более обширном материале установил, что этот период составляет 11 лет. Данная закономерность получила название закона Швабе — Вольфа, а само явление было названо 11-летним циклом солнечной активности. Впоследствии было установлено, что большинство явлений в солнечной атмосфере имеют 11-летнюю периодичность. Такая периодичность была обнаружена не только в характеристиках солнечных пятен, но и в характеристиках протуберанцев, вспышек, корональных выбросов массы, корональных дыр, солнечного ветра, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца и т. п. В частности, солнечная постоянная также оказывается не совсем постоянной, а изменяется с амплитудой около 0.1 % и

периодом 11 лет. В настоящее время под солнечной активностью подразумевают совокупность явлений, связанных с магнитными свойствами солнечной плазмы и периодически возникающих в солнечной атмосфере.

Изменения солнечной активности вызывают изменения в межпланетном и околоземном космическом пространстве, которые, в свою очередь, влияют на функционирование космических и наземных технологических систем, а также определенным образом на климат и жизнедеятельность живых организмов на Земле. Земля имеет атмосферу и собственное магнитное поле, которые защищают ее от губительного для живых организмов влияния потоков солнечной ультрафиолетовой и рентгеновской радиации и солнечной плазмы. Только очень энергичные солнечные космические лучи, возникающие при т. н. протонных вспышках, могут достигать земной поверхности. Большинство же изменений космической погоды возле Земли вызывают возмущения земного магнитного поля, в том числе и т. н. магнитные бури. Именно во время мощных геомагнитных бурь, количество которых коррелирует с уровнем солнечной активности, существенно увеличивается радиационный фон в верхних слоях земной атмосферы, происходит ухудшение или потеря связи со спутниками, самолётами и наземными станциями, и даже катастрофические аварии на линиях связи и электропередач. Особенно ощутимо это влияние в приполярных широтах.



В настоящее время на орбитах вокруг Земли вращается большое количество низкоорбитальных спутников: спутники связи, навигационные, дистанционного зондирования и картографирования, научные, военные и др. В среднем срок эксплуатации низкоорбитального спутника составляет 5—7.5 лет. При увеличении уровня солнечной активности увеличивается поток ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, вследствие чего увеличивается плотность и температура верхних слоев земной атмосферы, увеличивается трение о воздух низкоорбитальных спутников и космических станций, что может привести к их «неожиданному» торможению и уменьшению высоты их орбиты или даже к резкому торможению и последующему сгоранию в более плотных слоях атмосферы. Именно такое произошло в июле 1979 г. вблизи максимума 21-го цикла солнечной активности с американской космической станцией «Скайлэб» после крупной солнечной вспышки. Внезапное увеличение солнечной активности может привести не только к быстрому торможению спутника и его гибели, но и к выходу из строя электронного оборудования на спутнике. Увеличение уровня солнечной активности сопровождается увеличением радиационного фона, что может быть очень опасным для космонавтов, работающих на орбите, и даже для пилотов и пассажиров самолетов (особенно в приполярных районах). Поэтому знание предстоящего уровня солнечной активности является очень важным для космической отрасли.

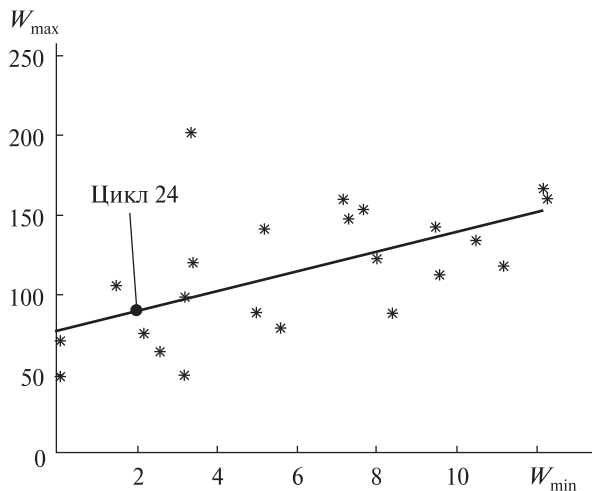
Наиболее известной характеристикой солнечной активности является число Вольфа, характеризующее количество пятен на видимой поверхности Солнца. На сегодня предложено много методов прогнозирования солнечной активности, которые базируются как на анализе наблюдаемых закономерностей между различными характеристиками солнечных, геофизических, климатологических явлений, так и на теоретических моделях солнечной активности, на компьютерном моделировании числовых рядов или искусственных нейронных сетях (см., например, работы [2, 11, 18, 22, 26] и ссылки в них). Большинство методов прогнозирования солнечной

активности дают только прогноз максимального значения числа Вольфа в цикле, часто эти прогнозы довольно существенно отличаются друг от друга.

К настоящему времени опубликовано более полусотни прогнозов 24-го цикла солнечной активности, они предсказывают для 24-го цикла значение максимального числа Вольфа от 42 [9] до примерно 190 [14]. Многие прогнозы собраны и проанализированы в работе [19] и на сайте Янссена (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24.html>).

В нашей предыдущей работе [3] был дан предварительный прогноз величины и эпохи максимума для 24-го цикла солнечной активности на основании изучения корреляционных связей между характеристиками солнечных циклов. Было получено, что максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа будет составлять  $110 \pm 33$  в апреле — июне 2012 г. Тогда мы ещё не могли точно указать эпоху минимума цикла и значение числа Вольфа в эпоху минимума. Теперь же, когда 24-й цикл набирает силу, мы можем дать для него более точный прогноз.

В данной работе речь будет идти о прогнозе максимума текущего 24-го цикла солнечной активности, т. е. о долгосрочном прогнозе. Как известно, первые солнечные пятна с полярностью 24-го цикла наблюдались на Солнце в начале января 2008 г. Как правило, период времени в минимуме солнечной активности, когда одновременно наблюдаются солнечные пятна с полярностью предыдущего и последующего циклов, составляет год-полтора. Большинство прогнозов предсказывали минимум солнечной активности на 2006—2007 гг. и максимум 24-го цикла на 2011—2013 гг. Однако 23-й цикл оказался более глубоким и продолжительным, чем ожидалось. Проведенный нами анализ данных SIDC (<http://sidc.oma.be>) показал, что минимум сглаженного по 13 точкам среднемесячного числа Вольфа составляет около 1.8 в начале 2009 г. (примерно момент времени 2009.1). Таким образом, минимум солнечной активности между 23-м и 24-м циклами является самым глубоким за последние примерно 100 лет (после минимума между 14-м и 15-м циклами).



**Рис. 1.** Зависимость числа Вольфа  $W_{\max}$  в максимуме цикла от числа Вольфа  $W_{\min}$  в минимуме цикла и прогноз для 24-го цикла

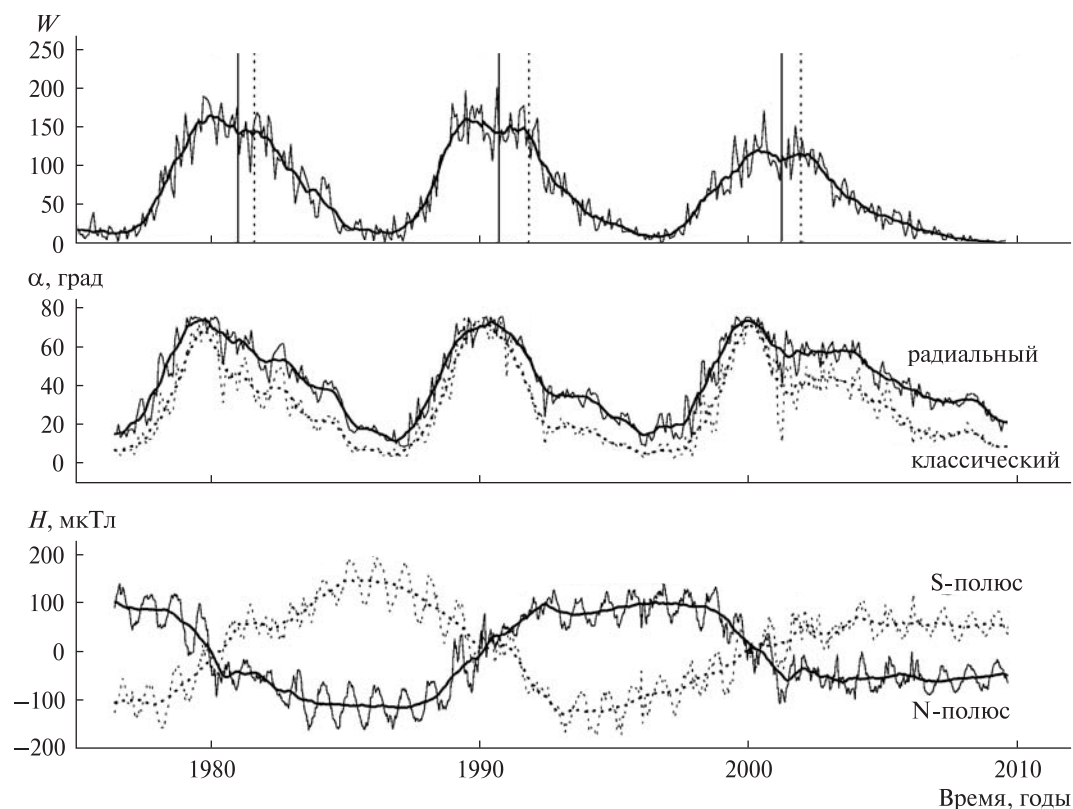
Это значение сглаженного среднемесячного числа Вольфа в эпоху минимума можно использовать для уточненного прогноза 24-го цикла солнечной активности по схеме, предложенной нами в работе [3]. Если это значение подставить в уравнение (1) работы [3], то для максимума 24-го цикла получится сглаженное среднемесячное значение числа Вольфа  $88 \pm 17$  (рис. 1). Таким же образом из уравнения (3) получаем, что длительность фазы роста 24-го цикла составит примерно 5 лет, т. е. максимум цикла ожидается в эпоху 2014.1. Далее, из уравнения (5) работы [3] следует, что длительность фазы спада цикла составит примерно 6.3 года. Отсюда получаем, что длительность цикла составит примерно 11.3 года, т. е. следующий минимум солнечной активности ожидается в мае — июне 2020 г.

Таким образом, 24-й цикл солнечной активности ожидается сравнительно невысоким, с максимальной амплитудой  $88 \pm 17$  по среднемесячным значениям числа Вольфа. Это составит чуть более 70 % от максимальной амплитуды 23-го цикла и почти 44 % от максимальной амплитуды 19-го цикла — самого высокого из наблюдавшихся циклов. Величина 24-го цикла будет почти точно соответствовать величинам 1-го и 13-го циклов (86.5 и 87.9 соответственно). Очень близкие прогнозы максимальной амплитуды 24-

го цикла солнечной активности были получены ранее в работах [7] и [10] ( $88$  и  $87.5 \pm 23.5$ ).

Природа солнечной активности ещё не до конца понятна. Вероятно, решающую роль в возникновении этого явления играет дифференциальное вращение Солнца. Согласно динамо-модели солнечных циклов Бэбкока — Лейтона [8, 13], силовые линии полярного магнитного поля Солнца (полоидальное поле) в эпоху минимума активности закручиваются дифференциальным вращением Солнца так, что формируют тороидальное поле. Это тороидальное поле далее в цикле солнечной активности всплывает к поверхности и прорывается над фотосферой, образуя активные области и солнечные пятна. В последующем постепенный распад этих активных областей и диффузия их к полюсам приводит к образованию солнечных полярных магнитных (полоидальных) полей с противоположным направлением вектора магнитного поля. Весь процесс повторяется через 11 лет асимметрично, и через 22 года полностью симметрично.

На рис. 2 показаны изменения со временем среднемесячного относительного числа  $W$  солнечных пятен (числа Вольфа), наклона  $\alpha$  гелиосферного токового слоя (ГТС) и величины  $H$  полярного магнитного поля Солнца в 21—23-м циклах солнечной активности. Числа Вольфа взяты на сайте <http://sidc.oma.be>, а полярные поля и наклоны ГТС — на сайте <http://wso.stanford.edu>. Жирными линиями показаны данные, усредненные по 13 точкам. Сплошные и пунктирные вертикальные линии соответствуют моментам переполусовок (смены знака) магнитного поля на северном и южном полюсах соответственно согласно данным работы [4]. Видно, что максимальная величина полярного магнитного поля наблюдается в периоды минимумов солнечной активности. Смены знака полярного магнитного поля происходят вблизи максимумов солнечной активности и не совпадают во времени в северном и южном полушариях. Наклон ГТС характеризует угол между солнечным экватором и солнечным магнитным экватором и имеет максимальное значение в максимуме солнечной активности. Гелиосферный токовый слой является отобра-



**Рис. 2.** Изменение со временем (сверху вниз): среднемесячного числа Вольфа  $W$ , наклона  $\alpha$  гелиосферного токового слоя и полярного магнитного поля  $H$  Солнца в 21–23-м циклах солнечной активности. Сплошная и пунктирная вертикальные линии соответствуют моментам переполюсовок магнитного поля на северном и южном полюсах соответственно (согласно данным [4])

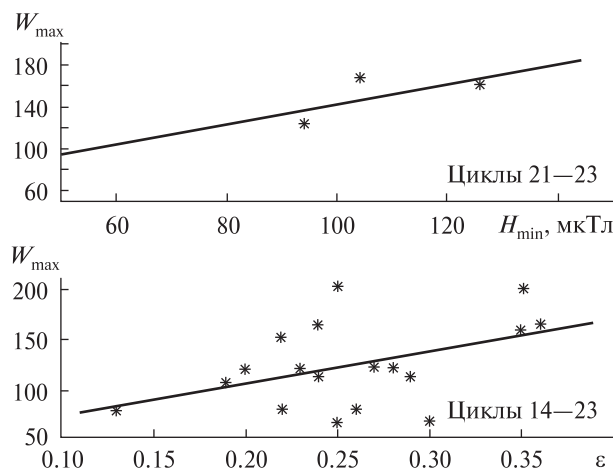
жением положения магнитной нулевой (нейтральной) линии магнитного поля Солнца на поверхности источника и определяет структуру всего глобального гелиосферного магнитного поля, и в частности, структуру межпланетного магнитного поля вблизи Земли. Гелиосферный токовый слой разделяет межпланетное пространство на две части с противоположно направленными открытыми линиями магнитного поля и является как бы каркасом всей гелиосферы. Отметим, что эволюция со временем наклона ГТС и полярного магнитного поля Солнца хорошо описывается в рамках модели вращения с 22-летним периодом внутри Солнца некоего магнитного ротатора [6].

Из динамо-модели солнечных циклов следует, что характеристики полярного магнитного поля Солнца в минимуме солнечной активности оп-

ределяют то, каким будет последующий максимум активности. Такие параметры, как величина полярного поля, количество полярных факелов, площадь корональных дыр, различные характеристики солнечной короны в минимуме цикла можно использовать в качестве предвестников величины солнечной активности в последующем максимуме цикла. Впервые это было сделано в работе [24] для прогнозирования величины максимальной амплитуды 21-го цикла. Позже в работе [12] был более подробно рассмотрен данный метод прогнозирования солнечной активности и сделан прогноз для 22-го цикла.

В таблице нами собраны значения индекса фотометрического сжатия  $\epsilon = a + b$  солнечной короны во время полных солнечных затмений вблизи минимума активности, усредненного полярного магнитного поля Солнца в миниму-

ме активности ( $H_{\min}$ ) и максимальные значения  $W_{\max}$  числа Вольфа в 14–24-м циклах активности. Значения  $\epsilon$  взяты из различных литератур-



**Рис. 3.** Зависимость среднемесячного числа Вольфа  $W_{\max}$  в максимуме цикла от величины полярного поля  $H_{\min}$  и индекса  $\epsilon$  сжатия солнечной короны в минимуме цикла

ных источников, величины полярного магнитного поля Солнца получены усреднением по 13 точкам данных из <http://wso.stanford.edu>. К сожалению, в настоящее время имеются измерения полярного магнитного поля только для последних четырех циклов солнечной активности. В среднем чем выше значение величин, характеризующих полярное поле в минимуме, тем выше последующий максимум солнечной активности. Более отчетливо это заметно на рис. 3, где приведены также линейные аппроксимации зависимостей среднемесячного числа Вольфа в максимуме цикла от величины полярного поля и индекса сжатия солнечной короны в минимуме цикла. Если в линейные зависимости подставить значения  $H_{\min} = 51$  мкТл и индекса  $\epsilon = 0.21$  в минимуме 24-го цикла (см. таблицу), то получим, что максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа составит примерно 94 и 104, что согласуется с прогнозом, полученным выше на основе средних параметров солнечных цик-

**Сравнение индекса сжатия солнечной короны  $\epsilon$  и величины полярного магнитного поля в минимуме цикла и числа Вольфа в максимуме цикла**

Затмение	$\epsilon$	Номер цикла	Эпоха минимума	$H_{\min}$ , мкТл	Эпоха максимума	$W_{\max}$
28.05.1900	0.30 [16]	14	1901.7	—	1907.0	64.2
17.05.1901	0.25 [16]	14	1901.7	—	1907.0	64.2
21.08.1914	0.19 [16]	15	1913.6	—	1917.6	105.4
20.09.1922	0.26 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
10.09.1923	0.22 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
25.01.1925	0.13 [16]	16	1923.6	—	1928.4	78.1
31.08.1932	0.20 [16]	17	1933.8	—	1937.4	119.2
14.02.1934	0.23 [1]	17	1933.8	—	1937.4	119.2
09.06.1945	0.32 [1]	18	1944.2	—	1947.5	151.8
30.06.1954	0.35 [31]	19	1954.3	—	1957.9	201.3
20.06.1955	0.25 [21]	19	1954.3	—	1957.9	201.3
20.07.1963	0.29 [27]	20	1964.9	—	1968.9	110.6
30.05.1965	0.24 [28]	20	1964.9	—	1968.9	110.6
23.10.1976	0.36 [29]	21	1976.5	104	1979.9	164.5
13.10.1977	0.24 [30]	21	1976.5	104	1979.9	164.5
22.11.1984	0.35 [15]	22	1986.8	126	1989.6	158.5
24.10.1995	0.28 [20]	23	1996.4	94	2000.4	120.8
09.03.1997	0.27 [17]	23	1996.4	94	2000.4	120.8
01.08.2008	0.21 [5]	24	2009.1	51	2014.1*	88*

\* — прогноз

лов. Прогноз по индексу  $\varepsilon$  несколько выше, чем прогноз по величине полярного поля, вероятно, вследствие того, что затмение 2008 г. произошло не точно в минимуме цикла. Оба эти прогноза имеют скорее оценочный характер.

Прогноз максимума 24-го цикла на основе значений величины полярного поля за несколько лет до эпохи минимума был сделан в работах [23] и [25], где были получены прогнозируемые максимальные значения числа Вольфа в 24-м цикле соответственно  $80 \pm 30$  и  $75 \pm 8$ . Эти значения несколько ниже полученного нами прогноза.

Таким образом, прогноз солнечной активности в максимуме 24-го цикла, основанный на предвестниках, вытекающих из динамо-модели солнечных циклов, как и прогноз, основанный на взаимосвязях между различными параметрами циклов 1–23, указывает на то, что 24-й цикл будет относительно слабым солнечным циклом. Максимальная амплитуда 24-го цикла по числам Вольфа будет составлять  $88 \pm 17$  (от 71 до 105).

*Работа частично выполнена в рамках проекта № Ф25.2/094 Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.*

1. Ван де Хюлст Х. К. Хромосфера и корона // Солнце / Под ред. Дж. Койпера. — М., 1957. — С. 184–281.
2. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. — Л.: Наука, 1973. — 257 с.
3. Пішкало М. І. Попередній прогноз 24-го і 25-го циклів сонячної активності на основі кореляції між характеристиками циклів // Кинематика и физика небес. тел. — 2008. — 24, № 5. — С. 370–378.
4. Пішкало М. І., Бабій В. П., Іванчук В. Г. Північно-південна асиметрія сонячної активності та переполюсовки глобального магнітного поля Сонця у 21–23 циклах активності // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. — 2005. — Вип. 41–42. — С. 86–90.
5. Пішкало М. І., Баранський О. Р. Сонячна корона під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. // Кинематика и физика небес. тел. — 2009. — 25, № 6. — С. 474–481.
6. Старкова Л. И., Соловьев Л. С. О прецессии магнитной оси Солнца // Письма в Астрон. журн. — 1997. — 23, № 3. — С. 236–240.
7. Чистяков В. Ф. Прогноз солнечной активности до 2030 года // Солнеч. данные. — 1983. — № 1. — С. 97–100.
8. Babcock H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. — 1961. — 133. — P. 572–587.
9. Clilverd M. A., Clarke E., Ulich T., et al. Predicting solar cycle 24 and beyond // Space weather. — 2006. — 4. — S09005.—DOI:10.1029/2005SW000207
10. Duhau S. An early prediction of maximum sunspot number in solar cycle 24 // Solar Phys. — 2003. — 213, N 1. — P. 203–212.
11. Lantos P., Richard O. On the prediction of maximum amplitude for solar cycles using geomagnetic precursors // Solar Phys. — 1998. — 182, N 1. — P. 231–246.
12. Layden A. C., Fox P. A., Howard J. M., et al. Dynamo-based scheme for forecasting the magnitude of solar activity cycles // Solar Phys. — 1991. — 132, N 1. — P. 1–40.
13. Leighton R. B. A magneto-kinematic model of the solar cycle // Astrophys. J. — 1969. — 156. — P. 1–26.
14. Li K.-J., Gao P.-X., Su T.-W. Estimating the size and timing of the maximum amplitude of solar cycle 24 // Chin. J. Astron. and Astrophys. — 2005. — 5, N 5. — P. 539–545.—DOI:10.1088/1009-9271/5/5/011.
15. Loucif M. L., Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1989. — 77. — P. 45–66.
16. Ludendorff H. Weitere untersuchungen über die änderungen der form der sonnenkorona // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse. — 1934. — 16. — P. 200–220.
17. Marková E., Bělík M., Rušín V., Kotrč P. Structure and shape of the white-light corona during March 9, 1997 and February 26, 1998 eclipses // Contribs Astron. Observ. Scalnate Pleso. — 1999. — 28, N 3. — P. 210–215.
18. Obridko V. N., Shelting B. D. On prediction of the strength of the 11-year solar cycle N 24 // Solar Phys. — 2008. — 248, N 1. — P. 191–202.—DOI:10.1007/s11207-008-9138-3.
19. Pesnell W. D. Predictions of solar cycle 24 // Solar Phys. — 2008. — 252. — P. 209–220. — DOI:10.1007/s11207-008-9252-2.
20. Rušín V., Klocok L., Minarovjeh M., Rybanský M. The solar corona during the total solar eclipse of October 24, 1995 // Contribs Astron. Observ. Scalnate Pleso. — 1996. — 26, N 1. — P. 37–45.
21. Saito K. Photometry of the solar corona at the total eclipse on June 20, 1955 // Publ. Astron. Soc. Jap. — 1956. — 8, N 3-4. — P. 126–141.
22. Schatten K. Solar activity prediction: Timing predictors and cycle 24 // J. Geophys. Res. — 2002. — 107. — SSH 15-1.—ID 1377.—DOI:10.1029/2002JA009404.
23. Schatten K. Fair space weather for solar cycle 24 // Geophys. Res. Lett. — 2005. — 32. — L21106.—DOI:10.1029/2005GL024363.
24. Schatten K. H., Scherrer P. H., Svalgaard L., Wilcox J. M. Using dynamo theory to predict the sunspot number during solar cycle 21 // Geophys. Res. Lett. — 1978. — 5. — P. 411–414.



25. *Svalgaard L., Cliver E. W., Kamide Y.* Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? // *Geophys. Res. Lett.* — 2005. — **32**. — L01104.—DOI:10.1029/2004GL021664.
26. *Thompson R. J.* A technique for predicting the amplitude of the solar cycle // *Solar Phys.* — 1993. — **148**, N 2. — P. 383—388.
27. *Waldmeier M.* Die Helligkeitsverteilung in der Korona bei der Sonnenfinsternis vom 20. Juli 1963 // *Z. Astrophys.* — 1964. — **60**. — P. 28—42.
28. *Waldmeier M.* Die Helligkeitsverteilung in der Korona bei der Sonnenfinsternis vom 30. Mai 1965 // *Z. Astrophys.* — 1966. — **63**. — P. 242—266.
29. *Waldmeier M., Weber S. E.* Shape and structure of the corona at the solar eclipse of October 23, 1976 // *Astron. Mitt. Eidgen. Sternwarte Zürich.* — 1977. — N 353.
30. *Waldmeier M., Weber S.E.* The solar eclipse of October 12, 1977 // *Astron. Mitt. Eidgen. Sternwarte Zürich.* — 1978. — N 369.
31. *Wallenquist A.* On the distribution of light in the solar corona of June 30, 1954 // *Uppsala Astron. Obs. Ann.* — 1957. — **4**, N 4. — P. 3—36.

Надійшла до редакції 18.02.10

*M. I. Pishkalo*

PREDICTION OF THE MAXIMUM  
OF SOLAR CYCLE 24

Our prediction of the maximal Wolf number and of the maximum epoch for the solar cycle 24 is presented. The prediction is developed using both mean characteristics of solar cycles 1—23 and observed magnitudes of solar polar magnetic fields and values for the flattening index of the solar corona at the minimum epoch. Solar cycle 24 is expected to amount up to a maximal amplitude of  $88 \pm 17$  at the beginning of 2014. The next minimum is anticipated to be in the first half of 2020. The duration of solar cycle 24 will be about 11.3 years.

УДК 528.8.04: 551.4

**В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, В. В. Григоренко**

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

## **ЗІСТАВЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ТА НАЗЕМНИХ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПОЗИЦІЇ ЧЕРВОНОГО КРАЮ СПЕКТРІВ ВІДБИТТЯ**

---

*Проведено зіставлення гіперспектральних даних супутникового сенсора EO-1 «Hyperion» і спектрометричних даних спектродіаметра ASD FieldSpec® 3F для оцінювання позиції червоного краю (REP) спектрів відбиття деяких типів земного покриття на тест-ділянці Маріїнського парку м. Києва. При дослідженнях використано знімок сенсора EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) та дані наземних вимірювань 15.04.2009 р. і 16.09.2009 р. Встановлено залежність величини REP від методу обчислення та від рівня обробки даних космознімання: чотириточковий метод лінійної інтерполяції атмосферно коригованих супутникових даних дає значення REP для трав'яного покриву, найближчі до обчислених за даними наземних вимірювань.*

---

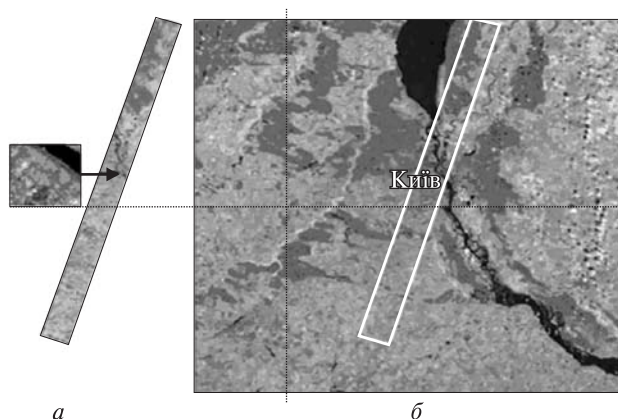
### **ВСТУП**

Дистанційне зондування Землі за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є потужним інструментом для тривалого моніторингу рослинного покриву. У зіставленні з традиційними багатоспектральними даними гіперспектральні дані пропонують нові спектральні характеристики, зокрема позицію червоного краю REP (Red Edge Position). За означенням [10] REP — це довжина хвилі в інтервалі  $\lambda\lambda = 680...760$  нм, де швидкість зміни спектра відбиття досягає максимуму. За даними досліджень [5–9, 12] REP є індикатором стану рослинності та вегетаційного стресу, наслідком якого є зсуви REP. Вегетаційні стреси різної природи, які призводять до зменшення хлорофілу, проявляються у спектрах відбиття рослин зсувами до коротких довжин хвиль (так званий «голубий зсув»). Збільшення вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних стадіях їхнього розвитку від початку росту до цвітіння супроводжується зсувами REP у напрямку збільшення (так званий «червоний зсув»). Можливість ідентифікації різновидів рослинних спільнот за значенням REP та зміни REP внаслідок геохімічних стресів,

уражень рослин шкідниками, забруднення доквілля свідчать про потенційну можливість використання REP-зображень, побудованих за даними гіперспектрального космознімання [2, 4] для просторового аналізу стану рослинного покриву Землі на значних територіях.

Гіперспектральні зображення, які мають достатню просторову розрізненість, щоб описати діагностичні сигнатури, містять інформацію про відмінності між різновидами рослин і різними типами ґрунтів та мінералів. Однак досі не провадився довготривалий моніторинг змін рослинного покриву через відсутність багаточасових гіперспектральних даних та надійних методів отримання інформації про стресові зміни з аналізу даних ДЗ. Використання REP для класифікації земного покриву за даними аерознімання розглянуто у роботі [12], за даними космознімання — у роботах [1–3]. У роботі [12] проведено також зіставлення спектральних зсувів REP, отриманих з використанням гіперспектральних даних аерознімання та наземних вимірювань.

Дані, одержані супутниковими сенсорами, залежать як від типу сенсора, так і від часу знімання земної поверхні. Спектральні вегетаційні індекси, обчислені за цими даними для однієї і тієї ж ділянки поверхні, можуть залежати також від рівня обробки даних і можуть відрізнятися



**Рис. 1.** Синтезоване зображення знімка EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.) у межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) (а) та синтезоване зображення знімка «Landsat» ЕТМ (14 вересня 2001 р.) (синтез каналів 2, 4, 5) (б). Білий прямокутник на знімку «Landsat» ЕТМ вказує на розташування знімка «Hyperion». Фрагмент знімка EO-1 «Hyperion» вказує на ділянку детальних досліджень у межах загальної сцени

від індексів, обчислених за результатами наземних спектрометричних вимірювань. Тому порівняльному аналізу спектральних індексів для певного типу земного покриття, обчислених за різними джерелами даних, приділяється значна увага [1—4, 12—14]. Нам не відомі дослідження, які б стосувались зіставлення значень *REP* за гіперспектральними даними наземних вимірювань та даними космознімання сенсора EO-1 «Hyperion».

Мета нашої роботи — зіставити гіперспектральні дані супутникового сенсора EO-1 «Hyperion» і дані наземного вимірювання спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F при оцінюванні *REP*-спектрів відбиття деяких типів земного покриття на тест-ділянці Маріїнського парку м. Києва і перевірити правильність класифікації *REP*-зображень.

## ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

«Hyperion» — перший у світі гіперспектральний відеоспектрометр, встановлений на борту супутника EO-1, запущеного NASA 21 березня 2000 р. [11]. Він має 220 спектральних каналів в діапазоні від 400 до 2500 нм. Спектральна розрізненість його каналів в оптичному та близькочерво-

ному діапазоні становить 10 нм, а просторова розрізненість дорівнює 30 м для всіх каналів. Ширина стандартної сцени зйомки 7.7 км, довжина — 42 км. Альтитуда орбіти EO-1 — 705 км, така ж як і в «Landsat-7».

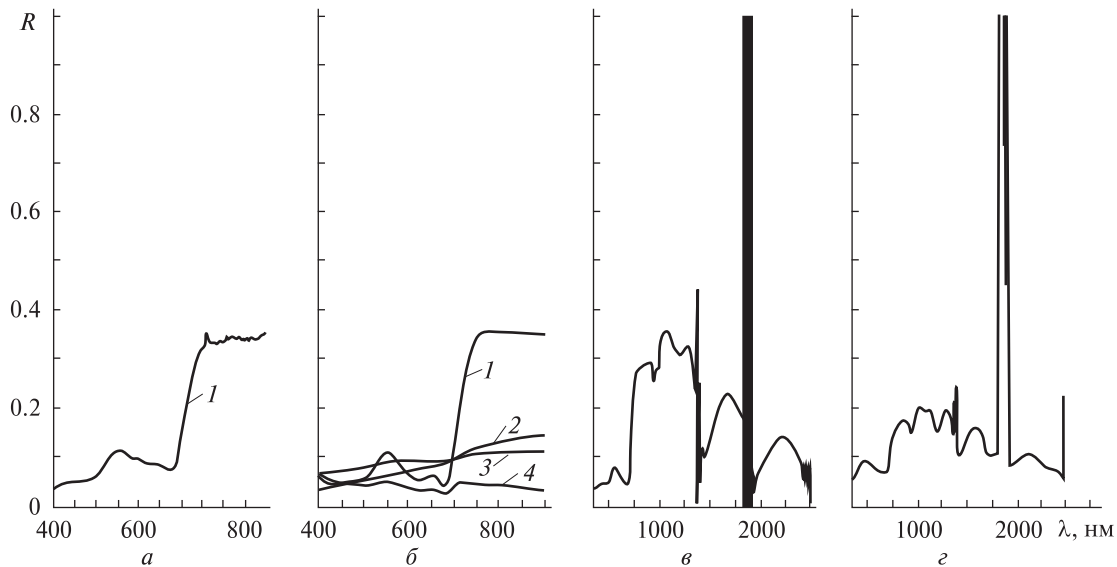
У дослідженні використано зображення EO1H1810252002244110PZ, отримане EO-1 «Hyperion» 14 вересня 2002 р. (рис. 1). Дані рівня 1 конвертовані до формату ERDAS Imagine за допомогою програми ENVI. Досліджувалась територія Києва та області. Ширина сцени приблизно 7.5 км, довжина — 94 км. Досліджувана територія розташована вздовж смуги, центральна лінія якої на півдні починається з точки, координати якої приблизно 30°21'35" с. д. та 50°01'05" пн. ш., і закінчується на півночі в точці з координатами приблизно 30°43'00" с. д. та 50°50'20" пн. ш.

У межах сцени для дослідження відбивних характеристик та вегетаційних індексів певних видів земного покриття виділено ділянку (рис. 1) для аналізу діапазонів змін вегетаційних індексів за даними «Hyperion» для основних різновидів рослинного покриття та земної поверхні.

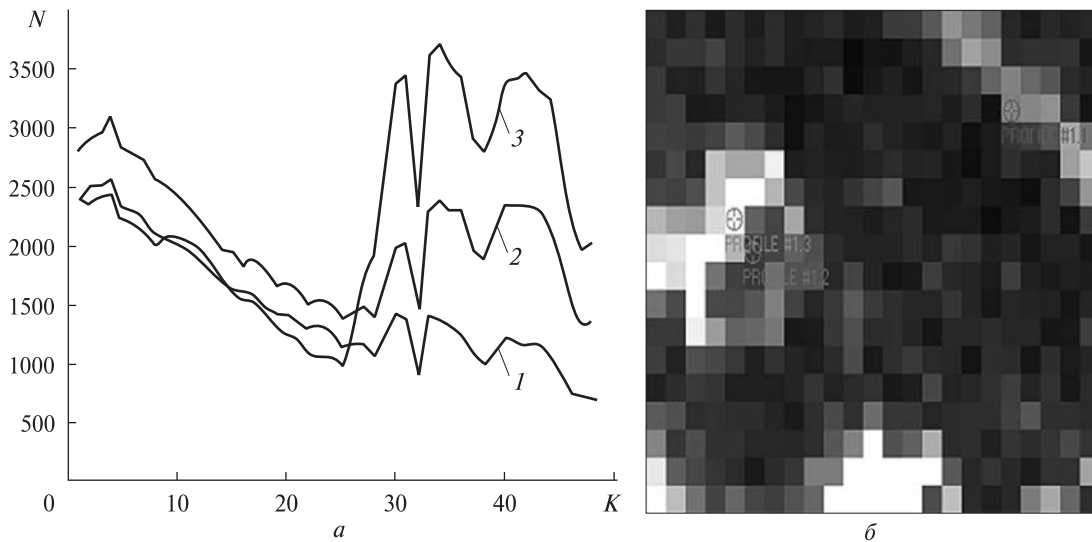
Наземні вимірювання спектрів відбиття від вибраних мішеней земного покриття зроблено за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F [див. сайт [www.asdi.com](http://www.asdi.com)]. Діапазон вимірювань приладу  $\lambda\lambda = 350...2500$  нм. Спектральна розрізненість складала 3 нм в діапазоні  $\lambda\lambda = 350...1000$  нм. Всі спектри були виміряні в надир. Дистанція між спектрорадіометром і мішенню становила приблизно 1 м. Вимірювання спектрів на набережній Дніпра проведені 15 квітня 2009 р. і 16 вересня 2009 р. За мішені земного покриття вибрано асфальтову дорогу і траву пір'ю на узбіччі набережної. Вимірювання спектрів трав'яного покриття та трибун на стадіоні «Динамо» м. Київ зроблені 16 вересня 2009 р. об 11 год за місцевим часом. Зразки спектрів відбиття наведено на рис. 2.

Зразки спектральних профілів за даними сенсора EO-1 «Hyperion» від 14 вересня 2002 р. на тест-ділянці зображення наведено на рис. 3.

Зіставлення даних наземної спектрометрії для вибраних класів наземного покриття із даними космозйомки вказують на необхідність гармонізації даних космознімання, які зазнають значних



**Рис. 2.** Спектральні значення коефіцієнта відбиття  $R$  за результатами зйомки спектро радіометром ASD FieldSpec® 3F: *a* — на набережній Дніпра 15 квітня 2009 р., *б* — на набережній Дніпра 16 вересня 2009 р. (*1* — пирій, *2* — асфальтова дорога, *3* — гранітна набережна, *4* — вода), *в* — на стадіоні «Динамо» 16 вересня 2009 р. трав'яного покриття, *г* — трибуни



**Рис. 3.** Зразки спектральних профілів трьох класів покриття (*a*) для фрагмента зображення тест-ділянки Маріїнського парку у синтезованих кольорах (*б*): *1* — асфальтова дорога (набережна Дніпра), *2* — трибуна стадіону «Динамо», *3* — трав'яний покриття стадіону «Динамо». Вертикальна вісь: покази  $N$  сенсора «Нурегіон», цілі числа. Горизонтальна вісь: номер  $K$  каналу

атмосферних впливів, із даними наземної зйомки, що вимагає додаткової обробки. При цьому можливі різні рівні обробки: з атмосферою корекцією даних і без корекції. Впливи рівнів об-

робки даних космоснімання на величину  $REP$  і залежність  $REP$ , як для даних наземної зйомки, так і для даних космозйомки, від методів обчислення, розглядається нижче.

## МЕТОДИ

До останнього часу методиці визначення  $REP$  за даними космознімання не приділялося достатньої уваги через відсутність на супутниках відповідних спектрометрів з достатньою кількістю каналів в зоні червоного краю. Наведемо формули обчислення  $REP$  з використанням даних сенсора EO-1 «Hyperion» та з використанням даних спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F, які відрізняються між собою внаслідок неоднакового розташування спектральних каналів в області червоного краю.

**Обчислення  $REP$  для даних гіперспектрального супутникового сенсора EO-1 «Hyperion».** Вперше значення позиції червоного краю  $REP$  за даними EO-1 «Hyperion» отримано в роботі [11]. Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції вона обчислюється за формулами

$$REP = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R_{35}}{R_{39} - R_{35}} = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R(701.55)}{R(742.25) - R(701.55)}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_{32} + R_{43}}{2} = \frac{R(671.02) + R(782.95)}{2},$$

де  $R(\lambda)$  — значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі  $\lambda$ ,  $R_i$  — значення коефіцієнта відбиття в  $i$ -му каналі,  $i = 32, 35, 39, 43$ . Зауважимо, що обчислені різними способами значення  $REP$  можуть не збігатися, а метод (1) є оптимальним щодо часу обчислень серед інших методів [11].

**Метод чотириточкової лінійної інтерполяції для даних спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F.** В табл. 1 наведено значення довжин хвиль, близь-

Таблиця 1. Порівняльна таблиця значень довжин хвиль сенсора EO-1 «Hyperion» та спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F для обчислення  $REP$  методом чотириточкової лінійної інтерполяції

Сенсор EO-1 «Hyperion»		Спектрорадіометр ASD FieldSpec®3F
номер каналу	$\lambda$ , нм	$\lambda$ , нм
32	671.02	671
35	701.55	701
39	742.25	742
43	782.95	783

ких до значень центрів каналів «Hyperion», які використовуються для обчислення  $REP$  за формулою (1).

Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції  $REP$  за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3F визначається за формулами

$$REP = 701 + 41 \frac{\bar{R} - R(701)}{R(742) - R(701)}, \quad (2)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2}.$$

**Метод поліноміальної апроксимації спектрів відбиття.** Метод полягає в апроксимації спектрів відбиття поліномами  $n$ -го степеня у вигляді

$$R(\lambda) = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i T_i(\lambda), \quad (3)$$

де  $T_i(\lambda)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  — поліноми Чебишева (або степеневі)  $i$ -го степеня 1-го роду [9], а коефіцієнти  $C_i$  визначаються методом найменших квадратів,  $R(\lambda)$  — коефіцієнт відбиття на довжині хвилі  $\lambda$ . Першу і другу похідну функції  $R(\lambda)$  визначаємо диференціюванням за змінною  $\lambda$ . За означенням,  $REP$  — те значення довжини хвилі  $\lambda \in [670, 780]$  нм, на якому перша похідна  $R'(REP)$  досягає максимуму, а друга похідна  $R''(REP)$  дорівнює нулеві і змінює знак при переході через точку  $\lambda = REP$  з плюса на мінус.

## РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕНЬ

Наведеними вище методами були обчислені за даними тестових спектрів відбиття земного покриву, одержаних за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3F 15 квітня 2009 р., коефіцієнти  $C_i$  апроксимаційних поліномів Чебишева для значень  $n = 4, 5, 9$  і відповідні значення позиції червоного краю  $REP$ . Результати обчислень наведено в табл. 2–4. Для обробки даних брали значення коефіцієнтів відбиття  $R$  з проміжку 600...900 нм із кроком 10 нм, який відповідає спектральній розрізненності сенсора «Hyperion».

Для демонстрації різниці спектрів відбиття в зоні червоного краю, спричиненої різним вмістом хлорофілу в листі рослин, на рис. 4 наведено спектральні коефіцієнти відбиття листя зеленого кущика трави пирію ( $I$ ) і кущика трави із



частково засохлими листками (2), зняті спектро-радіометром ASD FieldSpec® 3F на набережній Дніпра.

Із табл. 2 видно, що величина *REP* суттєво залежить від степеня апроксимаційного полінома, однак збільшення степеня з  $n = 5$  до  $n = 9$  не покращує точності визначення *REP*, оскільки значення коефіцієнтів, починаючи із  $C_5$ , близькі до нуля. Із табл. 2 також видно, що отримані значення *REP* для  $n = 5$  близькі до значень, обчислених за формулою чотириточкової лінійної інтерполяції (2) ( $\Delta\lambda = 0.8...3$ ).

Оскільки метод чотириточкової лінійної інтерполяції потребує значно меншої кількості обчислень, він може мати суттєву перевагу при обчисленні позиції червоного краю за даними гіперспектральної космозйомки, і особливо при попиксельному обчисленні позиції червоного краю для побудови *REP*-зображень за даними сенсора EO-1 «NuRegion».

Наведеними вище методами обчислено значення *REP* для трьох спектрів відбиття вибраних представників наземного покриву тест-ділянки, одержаних в результаті наземної зйомки спектро-радіометром ASD FieldSpec® 3F 15 квітня 2009 р. (рис. 2). Результати обчислень наведено

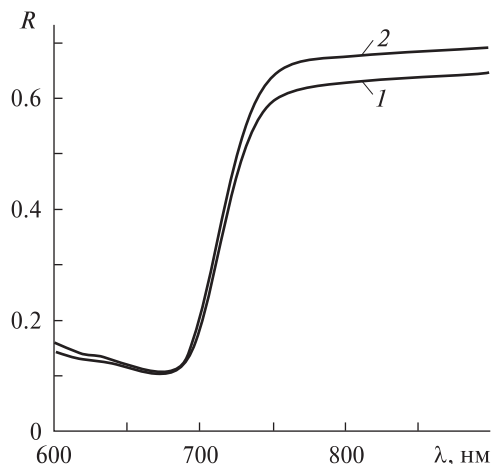


Рис. 4. Спектральні коефіцієнти *R* відбиття трав'яного покриву на набережній Дніпра за даними наземної зйомки від 15 квітня 2009 р.: 1 — зелений пирій, 2 — пирій із частково засохлими листям

в табл. 3. Зіставлення значень *REP* свідчить про те, що для трав'яного покриву значення *REP*, обчислені методом поліноміальної апроксимації при  $n = 5$ , найближчі до значень, одержаних методом чотириточкової лінійної інтерполяції. Для не рослинного покриву значення *REP*, одержані поліноміальним методом, більші, ніж значення,

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів  $C_i$  полінома Чебишева 1-го роду, що апроксимує спектри відбиття пирію на набережній Дніпра (метод (3)), а також відповідні значення *REP*, одержані методом поліноміальної апроксимації і чотириточкової лінійної інтерполяції (метод (2))

Метод, степінь полінома	$C_i$	<i>REP</i> , нм	$\sigma$
<i>Пирій з частково засохлими листям</i>			
Метод (3) $n = 4$	$C_0 = 0.4616, C_1 = 0.2730, C_2 = -0.0115, C_3 = -0.0410, C_4 = 0.0167$	705	0.0908
$n = 5$	$C_0 = 0.4616, C_1 = 0.3010, C_2 = -0.0115, C_3 = -0.0351, C_4 = 0.0167, C_5 = 0.0033$	717	0.0858
$n = 9$	$C_0 = 0.4424, C_1 = 0.2952, C_2 = -0.0252, C_3 = -0.0359, C_4 = 0.0138, C_5 = 0.0035, C_6 = -0.0038, C_7 = 0.0003, C_8 = 0.0006, C_9 = -0.0001$	714	0.0271
Метод (2)	—	719.08	—
<i>Зелений пирій</i>			
Метод (3) $n = 4$	$C_0 = 0.4309, C_1 = 0.2562, C_2 = -0.0104, C_3 = -0.0376, C_4 = 0.0152$	705	0.0941
$n = 5$	$C_0 = 0.4309, C_1 = 0.2830, C_2 = -0.0104, C_3 = -0.0319, C_4 = 0.0152, C_5 = 0.0032$	720	0.0890
$n = 9$	$C_0 = 0.4135, C_1 = 0.2771, C_2 = -0.0229, C_3 = -0.0328, C_4 = 0.0125, C_5 = 0.0033, C_6 = -0.0036, C_7 = 0.0003, C_8 = 0.0006, C_9 = -0.0001$	714	0.0329
Метод (2)	—	719.91	—

**Таблиця 3. Значення REP для спектрів відбиття представників трьох класів наземного покриття, обчислених різними методами за даними наземної зйомки 16 вересня 2009 р.**

Тип покриття	REP, нм		ΔREP , нм
	Метод (3)	Метод (2)	
Асфальтова дорога (набережна Дніпра)	756 (n = 4)	739.12	15.88
	753 (n = 5)		12.88
	744 (n = 9)		3.88
Трибуна стадіону «Динамо»	735 (n = 4)	732.98	2.02
	744 (n = 5)		11.02
	735 (n = 9)		2.02
Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	711 (n = 4)	722.05	11.05
	726 (n = 5)		3.95
	713 (n = 9)		9.05

**Таблиця 4. Значення REP за даними сенсора EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.) та спектродіаметра ASD FieldSpec®3F (16 вересня 2009 р.) для спектрів вибраних класів наземного покриття на тест-ділянці**

Тип покриття	REP, нм		
	ASD FieldSpec® 3F	EO-1 «Hyperion»	
		атмосферно некориговані дані	атмосферно кориговані дані
Трибуна стадіону «Динамо»	732.98	731—745.8	732.1—737.4
Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	722.05	725.5—726.5	720.1—723.4

обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції, причому різниця між ними перевищує 10 нм для спектрів відбиття як набережної Дніпра, так і трибун стадіону «Динамо».

Для зіставлення гіперспектральних даних наземної зйомки та космозйомки значення REP, обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції, для спектрів відбиття трибун і трав'яного покриття стадіону (16 вересня 2009 р.) та діапазони значень REP, визначені при автоматизованій класифікації REP-зображень фрагмента тест-ділянки (рис. 3), побудованих за значеннями атмосферно некоригованих та коригованих даних [3] сенсора EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.), наведено в табл. 4.

Видно, що класифікація трав'яного покриття за атмосферно коригованими даними точніша, ніж за некоригованими даними сенсора EO-1 «Hyperion». Підтвердженням цього факту є те,

що останні не узгоджуються з даними наземної зйомки [3].

Для техногенних споруд (трибуни стадіону) з наземними вимірюваннями узгоджуються як атмосферно кориговані, так і некориговані дані сенсора EO-1 «Hyperion».

## ВИСНОВКИ

Встановлено, що величина REP для спектрів відбиття наземного покриття суттєво залежить від методу обчислень. Так, у методі поліноміальної апроксимації спектральних коефіцієнтів відбиття пирію за даними наземної зйомки величина REP суттєво залежить від степеня апроксимаційного полінома. Зіставлення значень REP спектрів пирію, обчислених методом чотириточкової лінійної інтерполяції та поліноміальної апроксимації при використанні поліномів 5-го степеня показало оптимальність методу чотириточкової лінійної інтерполяції щодо часу обчислень та кількості вхідних даних, що має суттєве значення при попіксельному обчисленні значень REP для побудови REP-зображень за даними космознімання.

Використання атмосферно коригованих даних сенсора EO-1 «Hyperion» дає точніші значення REP для трав'яного покриття, ніж у випадку некоригованих даних.

1. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Класифікація земного покриття Карпат з використанням наземного хлорофільного індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 5/6. — С. 10—14.
2. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» для класифікації земного покриття // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 3. — С. 55—68.
3. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Коригування впливу атмосфери на гіперспектральні дані сенсора EO-1 «Hyperion» при обчисленні позиції червоного краю // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 3. — С. 32—41.
4. Сахацький О. І., Сибірцева О. М., Шпортюк З. М. Формування зображень на основі розрахунків вегетаційних індексів червоного краю за даними ENVISAT MERIS // Шестая Украинская конференция по

- космическим исследованием: Сб. тез. — Евпатория, НЦУИКС, 3—10 сентября 2006. — Евпатория, 2006. — С. 124.
5. *Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieux C.* Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands // *Remote Sens. Environ.* — 1992. — **41**, N 2/3. — P. 133—142.
  6. *Buschmann C.* Fernerkundung von Pflanzen // *Naturwissenschaften.* — 1993. — **80**. — S. 439—453.
  7. *Buschmann C., Nagel E.* Reflexionsspektren von Blättern und Nadeln als Basis für die physiologische Beurteilung von Baumschaden. PEF-Report Nr. 90. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992. — 165 s.
  8. *Buschmann C., Nagel E.* In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for the remote sensing of vegetation // *Int. J. Remote Sens.* — 1993. — **14**. — P. 711—722.
  9. *Collins W., Chang S.-H., Raines G., et al.* Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // *Economic Geol.* — 1983. — **4**, N 78. — P. 737—749.
  10. *Horler D.N.H., Dockray M., Barber J.* The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.* — 1983. — **4**. — P. 273—288.
  11. *Pu R., Gong P., Biging G., Larrieu M. R.* Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* — 2003. — **41**, N 4. — P. 916—921.
  12. *Rock B. N., Hoshizaki T., Miller J. R.* Comparison of the in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline // *Remote Sens. Environ.* — 1988. — **24**. — P. 109—127.
  13. *Soudani K., Francois C., le Maire G., et al.* Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands // *Remote Sens. Environ.* — 2006. — **102**. — P. 161—175.
  14. *Zarco-Tejada P. J., Miller J. R.* Land cover mapping of BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104D**, N 22. — P. 27921—27933.

Надійшла до редакції 26.01.10

*V. I. Lyalko, Z. M. Shportjuk, A. I. Sakhatsky,  
O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin, V. V. Grigorenko*

#### COMPARISON OF SATELLITE AND GROUND-BASED HYPERSPECTRAL DATA FOR THE RED EDGE POSITION ESTIMATION

We compared hyperspectral data from EO-1 Hyperion and spectrometric data from the spectrometer ASD FieldSpec 3F to evaluate the Red Edge Position of reflectance spectra for different land cover types within the test area of the Mariinskyi park in Kyiv. The satellite EO-1 Hyperion image made on 14 September 2002 and ground-based ASD FieldSpec 3F measurements performed on 15 April 2009 and 16 September 2009 were used. A relationship between the *REP* value and calculation method and image processing level is deduced. The four-point linear interpolation method for *REP* calculation from the atmospheric-corrected satellite data gives the results which are closest to the data calculated with the use of ground-based measurements of grass canopy.

УДК 528.8:630\*2(477)

**Г. М. Жолобак**

Науковий центр аерокосмічних досліджень землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

## **ВІТЧИЗНЯНИЙ ДОСВІД СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ МАСИВІВ УКРАЇНИ**

---

*Узагальнено вітчизняний досвід вивчення лісових масивів України за допомогою супутникових знімків, накопичений з середини 1990-х років. Описано здобутки установ і організацій, де проводяться дистанційні дослідження лісовкритих територій шляхом обробки і аналізу космічної інформації. Виявлено, що вітчизняні фахівці застосовують багатозональні знімки (здебільшого з космічних апаратів SPOT та «Landsat») головним чином для розрахунку зміни площ лісових масивів, визначення типів лісів, їхнього породного складу та віку переважно на регіональному рівні.*

---

### **ВСТУП**

Ліси були першими екосистемами, з яких розпочалось дистанційне вивчення вкритої рослинністю земної поверхні шляхом отримання аерофотознімків заліснених територій. У 1919 р. аерозйомка була використана для обліку лісових ресурсів у Канаді, а у 1921 р. — у США. В колишньому Радянському Союзі перші спроби застосування авіації для таксації лісів Підмосков'я були здійснені у 1922 р. [14]. З того часу аерофотознімання стало невід'ємною частиною картування лісів. Виготовлені на підставі цих знімків ортофотоплани і нині з успіхом застосовують при лісовпорядкуванні. Після Другої світової війни до арсеналу дистанційних методів було залучено спектрональну аерофотозйомку, а з 1960-х рр. — фотографічні і телевізійні знімки зі супутників чи пілотованих космічних апаратів. Тоді ж були створені нові знімальні оптико-електронні системи — сканери, які надавали інформацію про земні покриви як у видимій, так і в інфрачервоній області спектру. Це дозволило помічати з космосу такі зміни стану рослинності, які не сприймалися неозброєним оком. З 1970—1980 рр. за допомогою супутникових знімків стало можливим виявляти лісові пожежі в Австралії, контролювати вирубування лісів в басейні Амазонки та оцінювати обсяги лісових запасів на великих територіях [11].

Стрімкий розвиток сучасних вимірювальних засобів і комп'ютерних технологій, знімальної апаратури і методів опрацювання багатозональних супутникових знімків значно розширив можливості одержання інформації про лісові об'єкти. Цьому посприяла й поява в кінці ХХ — на початку ХХІ ст. доступних знімків з космічних супутникових систем. Окремі технічні характеристики сучасних космічних апаратів та сканерів наводяться у монографії [3]. Тут же подано інформацію про особливості інтерпретації багатоспектральних даних при вивченні лісів. Адже дешифрування різночасових космознімків за допомогою автоматизованих програмних комплексів, таких як ERDAS Imagine чи ENVI, дозволило вивчати не лише структурні, але й функціональні параметри лісових екосистем, зокрема потенційну продуктивність лісів, швидкість розвитку ураження ділянок лісу хворобами чи шкідниками, уможливило оперативне виявлення осередків усихання деревостанів чи виникнення лісових пожеж тощо. Деякі аспекти дистанційного моніторингу лісового покриву аналізуються в огляді [30].

Звісно, у практиці лісового господарства однією з найактуальніших є проблема оновлення тематичних лісових карт, тобто встановлення меж лісовкритої площі, визначення породного та вікового складу деревостанів. У поєднанні з іншими картами вони можуть стати основою



геоінформаційних систем для лісогосподарського виробництва та організації раціонального землекористування. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють на основі аерофотознімків і багатозональних супутникових знімків створювати такі карти.

Метою статті є огляд стану вітчизняних досліджень лісового фонду України за допомогою супутникових знімків.

## МОНІТОРИНГ ЛІСІВ ЯК ЗАВДАННЯ ЛІСОВПОРЯДКУВАННЯ

За даними Державного комітету лісового господарства (ДКЛГ) України, лісистість території держави відносно невисока і становить 15.7 %, лісовою рослинністю вкрито 9.7 млн га (<http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/>). Ліси зростають у різних природних зонах (Полісся, Лісостеп, Степ, Українські Карпати та гірський Крим), що істотно відрізняються за лісорослинними умовами, методами ведення лісового господарства та

використанням лісових ресурсів. Для ведення лісового господарства ліси надані у постійне користування підприємствам, установам, організаціям кількох десятків міністерств і відомств. Моніторинг лісів є спільною діяльністю виробничих та наукових установ ДКЛГ України. Наукові дослідження в галузі лісового господарства (див. рисунок) здійснюють підвідомчі наукові установи: у Харкові — Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького (УкрНДІЛГА, <http://uriffm.org.ua/uk/links>), який є провідним науковим центром лісівничої науки й наукових шкіл в Україні, та у Івано-Франківську — Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва ім. П. С. Пастернака (УкрНДІгірліс), який визначено в країні основною організацією з розробки науково-технічних питань ведення лісового господарства в гірських умовах.

Функції національного координаційного центру моніторингу лісів виконує УкрНДІЛГА. Од-



Мережа науково-дослідних організацій ДКЛГ України (зі сайту <http://uriffm.org.ua/uk/lns>)



ним з підрозділів його є лабораторія моніторингу і сертифікації лісів, яка організовує наукове, методичне та інформаційно-аналітичне забезпечення діяльності з моніторингу та інвентаризації лісів в Україні, досліджує різномасштабні антропогенні впливи на лісові екосистеми, розробляє методи сценарного аналізу, моделювання та планування для інформаційної підтримки сталого лісоуправління, впроваджує передові технології польового збору інформації про ліси з допомогою мобільних електронних засобів. За цими напрямками впродовж 1996—2008 рр. її співробітниками видано 275 публікацій (<http://www.uriffm.org.ua/labmonpublication>). Очолює лабораторію відомий лісознавець І. Ф. Букша, який свого часу схарактеризував перспективи використання аерокосмічної інформації для потреб моніторингу лісів, назвав переваги дистанційних методів та першочергові роботи з розвитку методології використання супутникових даних для дослідження лісових екосистем [5].

Проте й досі у практиці лісового господарювання спостереження за станом лісів проводяться наземними методами на ділянках моніторингу. Так, у 2007 р. спеціалісти Українського державного проектного лісовпорядного виробничого об'єднання (ВО) «Укрдержліспроект» (м. Ірпінь, [www.lisproekt.gov.ua](http://www.lisproekt.gov.ua)) провели спостереження в лісах на території 24 областей, ними було охоплено 1551 ділянку моніторингу і детально зафіксовано стан 36596 облікових дерев. Розподіл ділянок моніторингу за групами лісотвірних порід загалом відповідає особливостям породного складу лісів в областях. Методика обстежень гармонізована з вимогами Міжнародної спільної програми моніторингу лісів у регіоні Європейської Економічної комісії ООН (UN-ECE ICP Forests).

На даний час вдосконалення спостережної системи йде в напрямку освоєння нових технологій інвентаризації лісів (використання таких інструментів, як лазерні далекоміри, електронні висотоміри, електромагнітні компаси, супутникові навігаційні системи, електронні мірні вилки, польові комп'ютери). Але наступним кроком слід очікувати впровадження дистанційних технологій, оскільки вони забезпечують спрощення інвентаризаційних робіт, здешевлюють їх, прак-

тично унеможливають впливи суб'єктивних факторів та дозволяють охопити моніторингом більші площі за коротший проміжок часу.

Для прикладу варто зазначити, що застосування космічних технологій в лісовому секторі економіки Російської Федерації (РФ), де зосереджена п'ята частина всіх лісів світу і половина світових хвойних лісів (<http://www.forest.ru/rus/basics/>), є важливим напрямком спільної діяльності академічної, вузівської науки, державних, відомчих служб і комерційних організацій Росії [15, 27, 28, 39]. Зокрема, у 2005 р. дистанційним моніторингом порядку лісокористування було охоплено понад 52 млн га лісів у зонах інтенсивного освоєння семи суб'єктів Федерації. Обстежено 16 000 вирубок, великомасштабне підсупутникове аерофотознімання проведено приблизно на 100 тис. га. За два роки в РФ створено систему космічної зйомки лісів зі суцільним покриттям території панхроматичними матеріалами високої розрізненності (6—10 м) і багатозональними середньої розрізненності (20—30 м). Слід відмітити, що це перша в Росії діюча програма дистанційного моніторингу з високою просторовою розрізненністю [20].

На жаль, в Україні поки що не розроблено державної програми дистанційного (аерокосмічного) моніторингу лісів. З 1997 р. навіть припинилося бюджетне фінансування аерофотозйомки, в результаті чого лісовпорядкування змушене було перейти до спрощення технології, зазначає представник ВО «Укрдержліспроект» М. Швець [34]. На його думку, матеріали космічної зйомки досі не використовуються в лісовпорядкуванні через недостатню точність і їхню високу вартість. Проте в Україні фахівцями різних організацій вже отримані певні напрацювання та здобутки в цьому напрямку.

### **ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ УКРАЇНИ**

Застосування матеріалів дистанційного супутникового зондування для дослідження лісових масивів України розпочалось в нашій державі з середини 1990-х рр., коли відбувся поступальний прорив в розвитку геоінформаційних систем,

викликаний появою персональних комп'ютерів. Розвиток комп'ютерних технологій, які уможливили переведення даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в цифровий формат для їхньої наступної обробки, спричинив появу нового і дуже ефективного методу проведення просторового аналізу поверхні Землі.

Одними з перших багатозональні знімки різної просторової розрізненності для вивчення екологічного стану лісів та ландшафтів застосували спеціалісти Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (ЦАКДЗ, м. Київ). На знімку SPOT-4 від 23.08.1995 р. в районі зони впливу аварії на Чорнобильській АЕС ними було відокремлено чорновільхові ліси від дубово-грабових та осиково-березових [25, 37], а серед соснових лісів Зони відчуження виявлено лісові площі, уражені сосновим шовкопрядом, що підтвердилось наступними наземними дослідженнями [16].

Для класифікації лісового покриву гірських територій в Центрі було розроблено новий метод топографічної корекції даних багатозональних космознімків, який зменшує значення яскравостей пікселів зображень більш освітлених схилів, збільшує — для менш освітлених і не змінює ці значення, коли поверхня горизонтальна [18]. Цією ж групою вчених здійснено спробу з'ясувати можливості використання даних відеоспектрометра MERIS для класифікації земного покриву Українських Карпат. Дослідження показали, що зображення ENVISAT MERIS з грубою просторовою розрізненністю 1200 м забезпечує середній результат класифікації: добре виділяються лише хвойні ліси та вкриті снігом вершини. Класифікація з використанням множин індексів REP та MTCI дає кращі результати, ніж класифікація на основі значень відбиття [19].

У роботі [38] В. І. Лялько, О. І. Сахацький, А. Я. Ходоровський у співпраці зі спеціалістами Міжнародного інституту системного прикладного аналізу (IIASA, м. Відень) зробили спробу дослідити особливості використання багатозональної космічної зйомки для вивчення стану лісових масивів України, бореальних лісів Сибіру та оцінки кругообігу вуглецю в природі.

Впродовж останніх п'яти років триває успішне співробітництво спеціалістів ЦАКДЗ з фахівцями УкрНДІгірліс, завдяки якому започатковано організацію Карпатського полігону ДЗЗ. Дослідження стану його лісистості зроблено на підставі супутникових зображень низької та середньої розрізненності (NOAA/AVHRR, ENVISAT/MERIS, SPOT Vegetation, TERRA/MODIS, «Landsat-7/ETM»). Найбільш наближеними до фактичних даних розмірів площ лісовкритих територій були результати класифікації космознімків «Landsat-7/ETM». При аналізі цих знімків за період з 1979 до 2000 рр. встановлено, що тренд співвідношення площ листяних і хвойних лісів на дослідженій території вказує на збільшення площі листяних лісів [17, 29]. На підставі наземних обстежень та лісотаксаційних даних виконано керовану класифікацію гірських лісів Карпатського національного природного парку (КНПП) з метою виділення породного складу лісових насаджень. У межах гірських лісів найбільш вдало визначаються листяні ліси з перевагою бука (83 %), хвойні ліси надійно відокремлюються від листяних (понад 80 % випадків), легко ідентифікується рослинність на луках та вирубки різного віку, а також населені пункти, техногенні об'єкти у межах населених пунктів, хмари (100 %) [26]. Дослідження в цьому напрямку в Центрі тривають і тепер. З іншими публікаціями можна ознайомитись на його сайті [www.casre.kiev.ua](http://www.casre.kiev.ua).

Треба відзначити, що фахівці вузівської лісознавчої науки з Національного лісотехнічного університету України (НЛТУУ, <http://www.forest.lviv.ua>), що у Львові, теж наприкінці 90-х рр. почали залучати супутникові знімки для класифікації лісових насаджень [9, 10]. О. Г. Часковським визначено особливості застосування супутникових знімків SPOT для дослідження стану лісових насаджень природного заповідника «Розточчя» і прилеглих територій. Для диференціації рослинного покриву використано комбіноване зображення, складене з оригінальних каналів і додатково обчисленого за допомогою алгебраїчних операцій NDVI-каналу. В результаті автоматичного дешифрування супутникових знімків достовірно інтерпретовано по дві вікові категорії для класів листяних, хвойних та мішаних на-

саджень: молодші (вік насадження до 50 років) та старші (вище 50 років) [32]. Нині на кафедрі лісової таксації та лісовпорядкування НЛТУУ О. Г. Часковський читає курс «Дистанційна оцінка лісів». Роботи в цьому напрямку плідно продовжуються, зокрема О. Г. Часковським та С. І. Миклушем на підставі обробки знімків «Landsat-7» за 04.05.2000 р. і «Aster» за 28.10.2001 р. виявлено вирубки серед зімкнутих смерекових насаджень в районі Чорногори та створено карту лісових насаджень басейну Тиси. Зроблено висновок, що застосування для геометричного коригування орторектифікування і сегментування зображення для виділення лісової маски підвищує точність опрацювання супутникових знімків [33]. У співпраці з американськими та німецькими колегами на підставі аналізу знімків «Landsat» за 1988—2007 рр. та даних офіційної статистики в Українських Карпатах на рівні адміністративних районів чотирьох областей (Львівської, Івано-Франківської, Чернівецької та Закарпатської) виявлено зміни лісового покриву, викликані нелегальним вирубуванням та природним лісовідновленням на покинутих землях сільськогосподарського призначення. Отримані дані проаналізовано в контексті переходу України до сталого ведення лісового господарства [36].

Для виділення окремих класів лісових ділянок (листяні, хвойно-листяні чи листяно-хвойні та хвойні насадження, лісові культури (молодняки до 20 років), нелісові землі) С. А. Гаврилюк та С. І. Миклуш використали сканерні космічні знімки «Landsat» [8]. На основі цих знімків ними створено тематичну карту вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок («лісова маска») та цифрову карту лісів Західного Лісостепу України за групами порід. У докторській дисертації С. І. Миклуша представлено теоретико-методичні засади дешифрування модальних букових деревостанів України за сканерними космічними знімками, причому вказано на можливість виділення букових лісів з поділом за віком [22].

Отже, завдяки поєднанню наземної площинної інформації про ліси з інформацією дистанційних зйомок, використанню сучасної обчислювальної техніки і різноманітних математичних моделей вчені та викладачі НЛТУУ досягли

вагомих успіхів у дистанційному дослідженні лісів західної частини України.

В останні роки до впровадження ДЗЗ і ГІС-технологій долучились ще й представники вузівської лісознавчої науки з Національного університету біоресурсів і природокористування (НУ-БіП) України (Київ, <http://www.nubip.edu.ua>), де з 2003 р. функціонує кафедра геоінформаційних систем і технологій, яка є складовою Навчально-наукового інституту земельних ресурсів та правознавства. Тут працюють фахівці з цифрової обробки даних дистанційного зондування Землі, які з метою вивчення стану лісів Надвірнянського лісгоспу Івано-Франківської області провели керовану класифікацію знімків SPOT-5 з використанням матриці нечітких множин [13] та «Landsat-5» [23] і отримали цифрову карту лісових насаджень цієї території.

Співробітники координатора моніторингу лісів УкрНДІЛГА (м. Харків) також здійснювали розробку методичних підходів до використання матеріалів дистанційного зондування для виявлення осередків пошкодження насаджень [4]. Зараз у цьому науковому закладі в рамках чесько-українського проекту «Співробітництво в області інвентаризації лісових екосистем – ТехІнЛіс-2» у співпраці із спеціалістами Інституту дослідження лісових екосистем (IFER, Чеська Республіка) та ВО «Укрдержліспроект» розроблено ефективну технологію для створення і актуалізації ГІС у лісовому господарстві з допомогою Field-Map ([www.field-map.cz](http://www.field-map.cz)), яка може легко поєднуватися з супутниковими знімками [6]. Тому залучення космічних знімків для дистанційного моніторингу лісовкритих територій в УкрНДІЛГА має непогані перспективи в плані розвитку та впровадження передових технологій у лісовому і садово-парковому господарстві.

Фахівці різних організацій Харківщини, об'єднавшись в один науковий колектив, зробили спробу застосувати для дослідження лісів ще й радіолокаційні знімки з борту літака-лабораторії та космічного апарата «Алмаз». Ними виявлено, що текстура радіолокаційних зображень соснових борів більш дифузна, ніж текстура зображень дібров [2]. Дешифрування даних РСА

(радіолокатора з синтезованою апертурою) із залученням результатів апріорних спеціальних наземних досліджень інфраструктури окремих лісотворних порід (сосни та дуба) дозволило їм з високою точністю дистанційно оцінювати таксаційні параметри виділів і кількість ділової деревини. Також виявлено різницю радіолокаційних та радіотеплолокаційних контрастів лісопосадок та природних деревостанів за рахунок рядності структури. Показано вплив нагрівання фітоелементів і ажурності крони дерев на формування власного й вторинного випромінювання природних лісових масивів та лісопосадок рядної структури [1].

Крім наукових та освітніх організацій, до справи застосування супутникових знімків для вивчення лісів залучаються і фахівці, що працюють у підвідомчих установах Національного космічного агентства України (НКАУ). Одним із підприємств НКАУ є науково-дослідний і виробничий центр аерокосмічної інформації «Природа» (м. Київ, <http://www.pryroda.gov.ua>). Першочерговим його завданням стало створення архіву аерокосмічної інформації. Згодом Центр, окрім підтримки фонду аерокосмічної інформації, забезпечував збір заявок на космічні дані, їхню систематизацію, обробку інформації та надання її користувачам. З 2002 р. він щорічно проводить Регіональні наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем регіонів України». На таких нарадах у 2006—2008 рр. спеціалісти цього центру доповідали, зокрема, про створення цифрових карт лісів та об'єктів природно-заповідного фонду Рівненщини та Тернопільщини з використанням космічних знімків [21], а також давали оцінку зміни площ лісових масивів за допомогою ГІС/ДЗЗ технологій (на прикладі західних територій Закарпатської області) [24].

Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП), що є філією Національного центру управління та випробувань космічних засобів НКАУ і розташований в Дунаєвському районі Хмельницької області (<http://www.dzz.gov.ua/CPOSI>), одним з видів своєї наукової діяльності також визначає вивчення лісової рослинності дистан-

ційними методами. Тут за допомогою програмного продукту ENVI на основі даних «Landsat-5» і «Landsat-7» з метою відпрацювання алгоритму моніторингу лісів Західної України спільно з Західним науковим центром НАН і МОН України проведені дослідження на базі Долинського р-ну Івано-Франківської області та розпочаті роботи зі створення векторних карт лісонасаджень [7].

До робіт із застосування даних ДЗЗ для моніторингу лісу залучались також колективи недержавних установ. Однією з них є Міжнародна асоціація «Український Центр Менеджменту Землі та Ресурсів» (УЦМЗР) — одна з перших неприбуткових недержавних науково-технічних організацій в Україні, яка створена у січні 1999 р. Інститутом проблем національної безпеки при Раді національної безпеки та оборони України та інститутом США «Altarum» (Київ, <http://ulrnc.org.ua>). Зокрема, фахівцями УЦМЗР на підставі аналізу мозаїки знімків «Landsat-4» та «Landsat-7» для вкритої деревами території гірського Криму були виділені такі класи як «хвойний ліс», «листяний ліс», «чагарники і рідколісся», «згарища» і «сади». Найбільші зміни в лісовій рослинності зафіксовано у передгір'ї та місцях високого рекреаційного навантаження [31]. Крім цього, за екстремальними значеннями випромінювання у третьому каналі знімка NOAA/AVHRR визначались пожежі лісових масивів в окремих областях України [12].

Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що в Україні накопичено власний досвід обробки багатозональних космічних знімків для дистанційного моніторингу лісових екосистем. Основні здобутки в цьому напрямку отримані науковими колективами, що зосереджені в чотирьох містах держави (таблиця).

Оскільки в Україні систематично готуються молоді кадри що оволодівають новітніми технологіями обробки супутникової інформації, то слід очікувати подальшого прогресу у впровадженні дистанційних методів для потреб дослідження лісовкритих територій. Тому вбачається перспективним створення в Україні вітчизняної системи рентабельного дистанційного лісового моніторингу, яка була б заснована на принципах, узгоджених та гармонізованих з відповід-



## Установи супутникового дослідження лісів України

Назва установи	Місцезнаходження	Лісові об'єкти дистанційного вивчення	Використані супутникові знімки
Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України	Київ	Ліси Чорнобильської зони, Українських Карпат (КНПП), Волині (Шацький НПП)	NOAA/AVHRR, ENVISAT/MERIS, SPOT Vegetation, TERRA/MODIS, «Landsat-7/ETM»
Національний лісотехнічний університет України	Львів	Ліси природного заповідника «Розточчя», Західного Лісостепу України, Українських Карпат	SPOT, «Landsat-7», «Aster», «QuickBird»
Національний університет біоресурсів і природокористування	Київ	Ліси Надвірнянського лісгоспу Івано-Франківської області	SPOT-5, «Landsat-5»
Науково-дослідний і виробничий центр аерокосмічної інформації «Природа»	Київ	Ліси Північного Полісся (Рівненщина), північної частини Тернопільщини, західних районів Закарпатської області	«Landsat-7», «Aster», «QuickBird», «Ikonos»
Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, Науково-виробниче об'єднання «КВАНТ», Харківський національний університет ім. В. Каразіна, Харківська державна лісовпорядна експедиція	Харків	Ліси Співаківського і Скрипаївського полігонів-стаціонарів (Харківська область)	Радіолокаційні знімки з КА «Алмаз»
ЦПОСІ та КНП	Дунаївці	Ліси Долинського р-ну Івано-Франківської області	«Landsat-5», «Landsat-7»
Український центр менеджменту землі та ресурсів	Київ	Ліси України, зокрема гірських територій (Крим, Закарпаття).	NOAA/AVHRR, «Landsat-4», «Landsat-7»

ними програмами, що здійснюються під егідою Європейської Комісії. На широкому розумінні поняття «лісовий моніторинг», яке охоплює й оптимальну технологію збору даних про лісові екосистеми, в тому числі із застосуванням ДЗЗ, наголошується у висновках міжнародної конференції «Майбутнє лісового моніторингу в Європейському Союзі. Надання інформації для багатофункціонального управління лісами», що відбулась у м. Упсала, Швеція, 11—12 листопада 2009 р. [35].

## ВИСНОВКИ

Розвиток технічних засобів, висока періодичність, оперативність і доступність матеріалів дистанційного зондування дозволяють нині реалізувати такі задачі, які раніше можна було виконати лише на дорогих професійних апаратно-програмних комплексах. Це спричинило активне застосування методів ДЗЗ для отримання інформації про лісові екосистеми. В Україні

планомірні й систематичні дослідження лісовкритих територій із залученням супутникових даних ведуться з середини 1990-х рр. Отримані багатозональні знімки (здебільшого з космічних апаратів SPOT та «Landsat») аналізуються по-різному: візуально (за кольором, текстурою, щільністю фототону тощо) — в ДНВЦ «Природа», різними методами контрольованої (керованої) класифікації — в ЦАКДЗ, НЛТУУ, НУБіП. Набутий вітчизняними фахівцями досвід дозволяє використовувати результати обробки цих знімків для розрахунку зміни площ лісових масивів, визначення типів лісів, їхнього породного складу та віку переважно на регіональному рівні. Простежується тенденція до впровадження у практику масштабної лісової інвентаризації високоточних знімків «QuickBird» та «Ikonos», які є гідною альтернативою традиційним аерофотознімкам, і в недалекому майбутньому будуть значно дешевшими. Запорукою успішного впровадження дистанційних методів у практику



лісового господарства є співпраця спеціалістів технічного профілю з лісогосподарниками або ж оволодіння лісознавцями сучасними методами обробки даних ДЗЗ.

*Автор висловлює вдячність В. І. Ляльку, В. І. Парпану, О. І. Сахацькому та Ю. С. Шпорику за підтримку та корисні поради.*

1. *Атрошенко Л. М., Гайкович К. П., Горобець Н. Н. и др.* Особенности радиолокационных контрастов лесонасаждений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2008. — Т. 2. — С. 251—256.
2. *Атрошенко Л. М., Горобець Н. Н.* Перспективы изучения методами радиолокации таксационных характеристик и степени техногенной загрязненности лесов // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. — 2004. — № 622. — С. 132—136.
3. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування /* За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — К.: Наук. думка, 2006. — 357 с.
4. *Богомолов В. В., Костяшкін С. І., Мешкова В. Л. та ін.* Методичні підходи до використання матеріалів дистанційного зондування для виявлення осередків пошкодження насаджень // Лісівництво і Агролісомеліорація. — 2004. — Вип. 107. — С. 194—200.
5. *Букуша І. Ф.* Перспективи використання аерокосмічної інформації для потреб моніторингу лісів // Матер. третьої Укр. наради користувачів аерокосмічної інформації (20—24 листопада 2000 р., м. Київ). — К.: Знання України, 2001. — С. 85—91.
6. *Букуша І., Черни М.* Передові технології у лісовому господарстві України // Лісовий і мисливський журн. — 2006. — № 6. — С. 18—19.
7. *Вишняков В. Ю., Долинний В. В.* Динаміка змін вегетаційної маси в період 1992—2003 років за даними ДЗЗ (на прикладі Долинського району Івано-Франківської області) // Матер. регіональної наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Буковини», Чернівці, 19—20 вересня 2006 р. — <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=739>
8. *Гаврилюк С. А., Миклуш С. І.* Класифікація земель лісового фонду Західного Лісостепу України за матеріалами дистанційного знімання // Наук. вісник Нац. лісотехнічного ун-ту України. — 2007. — Вип. 17.3. — С. 26—35.
9. *Горошко М. П., Миклуш С. І., Часковський О. Г.* Використання супутникових знімків для класифікації лісових насаджень на територіях, які підлягають особливій охороні (на прикладі заповідника «Розточчя») // Проблеми та перспективи розвитку лісового господарства. — 1998. — Вип. 9.2. — С. 109—112.
10. *Горошко М. П., Часковський О. Г., Миклуш С. І.* Аспекти использования дистанционных методов исследований и ГИС-методов для интенсификации лесоинвентаризационных работ // Матер. міжнар. наук.-техн. конф. «Лес — экология и ресурсы». — Мінськ, 1998. — С. 61—63.
11. *Гэтланд К.* Космическая техника. — М.: Мир, 1986. — 292 с.
12. *Дубровський В. В., Пархісенко Я. В., Петроченко О. Ю. та ін.* Космічний моніторинг лісових пожеж за знімками NOAA // Космічна наука і технологія. — 2002. — 8, № 2/3. — С. 246—248.
13. *Кохан С. С.* Дані дистанційного зондування Землі і ГІС-технології у дослідженнях лісових ресурсів // Перспективи використання даних дистанційного зондування Землі в лісовому господарстві: Матер. міжнар. наук.-практ. семінару. — Київ, 2009. — С. 5—9.
14. *Лесная энциклопедия: В 2-х т./* Гл. ред. Г. И. Воробьев. — М.: Сов. энциклопедия, 1985. — Т. 1 — 563 с. — <http://forest.geoman.ru/forest/item/f00/s00/e0000006/index.shtml>.
15. *Лушня Е. А., Мазуров А. А., Еришов Д. В. и др.* Спутниковый мониторинг лесов России // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — 20, № 5. — С. 443—447.
16. *Лялька В. І., Сахацький О. І., Азімов О. Т. та ін.* Використання багатозональних космічних знімків з метою вивчення рослинності Зони відчуження ЧАЕС // Матер. наук.-техн. семінару «Нові методи в аерокосмічному землезнавстві», 27—28 травня 1999 р. — Київ, 1999. — С. 105—113.
17. *Лялька В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М. та ін.* Динаміка і sukcesії гірських лісів Карпатського національного природного парку (за матеріалами космічних знімків та ГІС) // Матер. регіональної наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Прикарпаття», Івано-Франківськ, 15—17 листопада 2005 р. — Івано-Франківськ, 2005. — С. 7—9.
18. *Лялька В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М.* Застосування методу топографічної корекції даних багатозональних космоснімків для класифікації лісового покриву гірських територій // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 4. — С. 94—98.
19. *Лялька В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М.* Класифікація земного покриву Карпат за використанням наземного хлорофільного індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 5/6. — С. 10—14.
20. *Маслов А. А.* Космический мониторинг лесов России: современное состояние, проблемы и перспективы // Лесной Бюллетень. — 2006. — № 31. — <http://www.forest.ru/rus/bulletin/31/3.html>.
21. *Мельник І. В., Томченко О. В., Шандра О. В. та ін.* Створення цифрових карт лісів та об'єктів природ-

- но-заповідного фонду з використанням космічних знімків // Регіональна нарада «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Рівненщини», Рівне, 12–14 грудня 2006 р. — <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=687>.
22. *Миклуш С. І.* Продуктивність рівнинних букових лісів та особливості організації сталого господарства в них: Дис. ... д-ра с.-г. наук. — Київ: НУБіП, 2009. — Машинопись. — <http://disser.com.ua/content/350639.html>.
  23. *Миронюк В. В.* Особливості визначення породного складу лісових насаджень із використанням даних ДЗЗ // Перспективи використання даних дистанційного зондування Землі в лісовому господарстві / Матер. міжнар. наук.-практ. семінару. — Київ, 2009. — С. 21–23.
  24. *Норчевський Р. В., Цебенко І. Л.* Оцінка зміни площ лісових масивів за допомогою ГІС/ДЗЗ-технологій (на прикладі західних територій Закарпатської області та північної частини Румунії) // Регіональна нарада «Можливості супутникових технологій у сприянні вирішення проблем Закарпаття», Ужгород, 11 грудня 2008 р. — <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=1140>.
  25. *Сахацький О. І., Ходоровський А. Я.* Класифікація ландшафтів за допомогою космічного знімка. Зона впливу аварії на Чорнобильській АЕС // Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів / За ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. — К.: НАН України, НКА України, ЦАКДЗ ІГН НАНУ, 1997. — С. 20–21.
  26. *Сахацький О., Жолобак Г.* Використання багатоспектральних космічних знімків для класифікації угідь та гірських лісів різного породного складу // Перспективи використання даних дистанційного зондування Землі в лісовому господарстві: Матер. міжнар. наук.-практ. семінару. — Київ, 2009. — С. 16–20.
  27. *Седых В. Н.* Аэрокосмический мониторинг лесного покрова. — Новосибирск: Наука, 1991. — 238 с.
  28. *Сухих В. И.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: Учебник. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. — 392 с.
  29. *Парпан В., Шпарик Ю., Лялька В. та ін.* Космічні знімки Українських Карпат // Лісовий і мисливський журн. — 2006. — № 3. — С. 13.
  30. *Поліщук Б. В.* Сучасні досягнення і проблеми в дослідженнях розвитку та стану лісів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2008. — Вип. 70. — С. 38–45. — <http://vlp.com.ua/node/915>.
  31. *Придатко В. И., Штепа Ю. Н., Ищук А. А.* Опыт применения ERDAS Imagine для анализа изменений лесов горного Крыма в 1988–2001 гг. с использованием снимков Landsat // Материалы Пятой Международной Конференции «Геоинформационные технологии в управлении территориальным развитием», 27–31 мая 2002 г., Партенит (АР Крым). — 2002, CD — ECOMM ([http://www.ulrnc.org.ua/publication/env-manag\\_ua.html](http://www.ulrnc.org.ua/publication/env-manag_ua.html)).
  32. *Часковський О. Г.* Інвентаризація лісових насаджень Розточчя з використанням дистанційних методів: Автореф. дис... канд. с.-г. наук / Нац. аграр. ун-т. — К., 2001. — 18 с.
  33. *Часковський О. Г., Миклуш С. І.* Застосування гіперспектральних супутникових знімків для спостережень за лісовими масивами // Наук. вісник Укр. держав. лісотехнічного ун-ту. — 2004. — Вип. 14.6. — С. 190–193.
  34. *Швець М. І.* Лісовпорядкування в Україні: історія і сучасність // <http://www.derevo.info/content/detail/4032>
  35. *Forest monitoring for Europe.* Conclusions, Uppsala, Sweden, 11–12 November 2009. — [http://www-conference.slu.se/futforestmon/forestmon\\_conclusions.pdf](http://www-conference.slu.se/futforestmon/forestmon_conclusions.pdf).
  36. *Kuemmerle T., Chaskovskyy O., Knorn J., et al.* Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007 // Remote sensing of environment. — 2009. — **113**, N 6. — P. 1194–1207.
  37. *Lyalko V. I., Sahatsky A. I., Voolfson L. D., et al.* Remote ecological monitoring in the Chernobyl disaster area using GIS TRIAS // Pollution Monitoring and Geographic Information Systems : proc. of the EARSEL Workshop, Brandys nad Labem, Gzech Republic, 15–18 May, 1995. — Brandys nad Labem., 1995 — P. 89 — 97.
  38. *Lyalko V. I., Sakhatsky A. I., Hodorovsky A. Ya., et al.* Features of the space control of forests of Ukraine and Siberia for an estimation of their state, fire risk and carbon cycle // Abstract Book. Proc. of 24th EARSEL Symposium «New Strategies For European Remote Sensing», IUC, Dubrovnik, Croatia, 25–27 May 2004. — P. 91.
  39. *Malysheva N., Shvidenko A., Nilsson S., Petelina S., Oesko A.* An overview of remote sensing in Russian forestry // IIASA Interim Report IR-00-034. — 2000. — 89 p. — <http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/pub/pubsrchK>.

Надійшла до редакції 20.01.10

G. M. Zholobak

#### DOMESTIC EXPERIENCE OF SATELLITE MONITORING OVER FOREST STANDS IN UKRAINE

The overview generalizes the domestic experience on the study of forest stands in Ukraine using satellite images stored from the mid-1990s. We represent the achievements of the various institutions and enterprises where remote sensing studies of woodlands are conducted using the satellite data processing and analyses. It is shown that domestic experts use multispectral images (acquired mostly by SPOT and Landsat) as a rule to estimate forest cover changes and to identify forest types, their natural composition and age mainly at the regional scale.

УДК 629.7.086:681.5183:524.491

**П. П. Сухов, С. К. Волков, Г. Ф. Карпенко**

Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»  
Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛЬНЫХ ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

---

*Експериментально показано можливість застосування широкопольної лінзової оптики для моніторингу високоорбітальних космічних об'єктів. Для об'єктива «Таїр 19500/3» при проникній здатності 15.5<sup>m</sup> за 10 с накопичення середня квадратична похибка координат малорухомих геостационарних супутників не перевищує 2". Приблизно 90 % вимірювань мали середню квадратичну похибку менше 1". При огляді геостационарної зони від 10° E до 37.5° W шириною 5°, площею 500 град<sup>2</sup> віднайдені всі 46 активних каталогізованих ГСС, що мають нахил до екватора, менший за 2.5°. Показано можливість використання широкопольної лінзової оптики для моніторингу низькоорбітальних КО висотою до 2000 км. З 39 космічних об'єктів, зафіксованих протягом 1 год у режимі нерухомого телескопа, 35 були ототожені за каталогом NORAD.*

---

Для мониторинга околоземного космического пространства с целью обнаружения каталогизированных, некаталогизированных низко-(НОКО) и высокоорбитальных космических объектов (ВОКО), включающих геостационарные (ГСС) и высокоэллиптические спутники (ВЭО) блеском до 15<sup>m</sup>; комет, астероидов, опасно сближающихся с Землей, необходимо использовать поле зрения телескопа в десятки или сотни квадратных градусов. При малых размерах светочувствительной поверхности приемников излучения типа ПЗС увеличить поле зрения можно одним из следующих способов.

1. Изготовление линзового редуктора поля для зеркальных телескопов (преобразователя, укорачивающего фокусное расстояние).
2. Изготовление новой зеркально-линзовой, линзовой оптики с большим полем зрения.
3. Использование ПЗС с большим размером рабочей поверхности.
4. Использование широкоугольных линзовых, зеркально-линзовых объективов, изготовленных ранее специально для фотографических наблюдений ИСЗ.
5. Одновременное использование нескольких объективов с перекрытием соседних площа-

док небесной сферы (принцип многокамерного астрографа).

С 2001 г. служба контроля космического пространства США приступила к проекту развития интегрированного набора систем обнаружения с широкими полями зрения. Было решено перепроектировать и «воскресить» оригинальные, светосильные фотографические камеры «Бейкер-Нана 500/1», изготовленные в 1955—1957 гг. и оснащенные зеркально-линзовой системой Шмидта [6]. С использованием ПЗС (4096×4096, пиксел 15 мкм, квантовая эффективность 90 %) при нескольких секундах накопления на этой камере достигнута проникающая способность до 16<sup>m</sup> в поле зрения до 6°.

В странах СНГ увеличение поля зрения телескопа при мониторинге геостационарной области (ГСО) достигается применением линзовых редукторов и изготовлением новых малоразмерных светосильных линзовых, зеркально-линзовых оптических систем [1, 3].

Как и авторы работы [6], мы считаем, что наиболее доступный и экономичный метод получения большого поля зрения — «реанимировать» и использовать широкоугольные объективы с высокими оптическими характеристиками, которыми были оснащены инструменты, изготовленные для позиционных фотографичес-

ких наблюдений ИСЗ. Это АФУ-75 (объектив «Уран-16750/3.5»), СБГ (зеркально-линзовый объектив Шмидта), ВАУ («Астродар»), модификации НАФА («Уран-9250/2.5», «Индустар-52», «Уран-16»), КПП («Уран-12 500/2.5»), КТС-30, КТ-50 и др. Их использование позволяет получать астрометрические результаты, практически одинаковые с системами [1, 3].

Для эксперимента были отобраны объективы «Зенитар-М», «Гелиос-40», «ВариоГоир Т-1-М», ОФ-233, «Уран-9», «Таир-19» [4, 5] (см. табл. 1). Объектив сочленялся с ПЗС-камерой фирмы FLI IMG 1001E (1024×1024, размер пиксела 24 мкм).

При обзорных наблюдениях ГСО преследовались следующие цели.

1. Достичь проникающей способности по ГСС до  $15^m$  при поле зрения телескопа  $3-7^\circ$  и времени накопления 10—15 с.
2. Исследовать возможность использования широкопольной оптики (ШПО) с полем зрения  $30 \times 30^\circ$  для мониторинга НОКО на низких орбитах.
3. Определить погрешность вычисляемых экваториальных координат КО для прогноза движения КО.
4. Определить оптимальные характеристики доступной ШПО для задач мониторинга низких и высокоорбитальных КО.

Ниже даны наиболее удачные результаты наблюдений на разных объективах.

**Обзор ГСО за 25.12.2006 с объективом ОФ-233.** С полем зрения  $7 \times 7^\circ$  проведен обзор геостационарной области от  $44^\circ \text{ E}$  —  $40^\circ \text{ W}$ . В течение 1 ч площадь около  $600 \text{ град}^2$  была просканирована дважды. Из 85 каталогизированных ГСС с наклоном к экватору менее  $3.5^\circ$  было обнаружено 80 объектов. Достигнута проникающая способность  $14^m$  по малоподвижным ГСС за 10 с накопления. Типичная СКО вычисления экваториальных координат ГСС составила  $1-2''$ .

**Обзор ГСО за 11.07.2007 г. с объективом «Таир-19».** При поле зрения  $3 \times 3^\circ$  проведен обзор ГСО шириной  $5^\circ$  от  $10^\circ \text{ E}$  до  $37.5^\circ \text{ W}$ . В течение 1 ч площадь более  $500 \text{ град}^2$  была просканирована дважды. В итоге были обнаружены все 46 каталогизированных активных ГСС с наклоном к экватору менее  $2.5^\circ$ , 12 пассивных, два высоко-

эллиптических КО. Из 450 измерений 90 % имели СКО менее  $1''$ , остальные — в пределах  $1-2''$ . Проницающая способность составила  $15.5^m$  по малоподвижным ГСС за 10 с накопления. При СКО  $1-2''$  прогнозирование (расчет эфемерид) движения объекта вполне достаточно для наведения на него узкопольных телескопов системы Кассегрена, Ричи-Кретьена с полем зрения до  $1^\circ$ . В табл. 2 приведены оптимальные характеристики малоразмерной линзовой ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации ГСС.

**Мониторинг низкоорбитальных космических объектов.** Использовался объектив «Зенитар-М», поле зрения  $30 \times 30^\circ$  ( $900 \text{ град}^2$ ), угловое разрешение —  $99''/\text{пкл}$ . Проницающая способность по звездам — до  $11^m$  за 1 с, по НОКО — до  $10.0^m$  (в зависимости от угловой скорости движения КО). Наблюдения велись при неподвижном телескопе. В течение 1 ч через поле зрения прошло 39 КО. Количество полученных фреймов за время прохождения спутников через поле зрения составляло от 3—9, время нахождения КО во фрейме составляло 16—120 с. Идентификация КО по орбитальным параметрам проводилась в ОНИИ МО (Харьков) А. Ткаченко и В. Ямницким. Использовались два метода отождествления: 1) по элементам построенной орбиты; 2) по отдельным измерениям. Результаты практически идентичны. Двумя методами по каталогу NORAD из 39 КО уверенно идентифицировано 35 (90 %) объектов. Оценки невязок параметров идентифицированных орбит находились в пределах:

наклонение орбиты — от  $0.04$  до  $0.14^\circ$ ,  
долгота восходящего узла — от  $0.06$  до  $0.26^\circ$ ,  
аргумент широты — от  $0.08$  до  $0.25^\circ$ ,  
период — от  $0.02$  до  $0.82$  мин.

Камера IMG 1001E имеет время считывания фрейма объемом в 1 Мб около 8 с. А использование ПЗС-матрицы площадью более  $6 \text{ см}^2$  при времени считывания фрейма 1 с, позволит увеличить поле зрения, количество обнаруженных НОКО, повысить точность расчета орбит. Характеристики ШПО для наблюдений НОКО (как и для иных задач) должны удовлетворять требованиям решаемой задачи. Для прогнозирования опасных сближений низкоорбитальных КО требуется оптика более высокого разреше-



ния. Для идентификации НОКО требования к ШПО менее критичны (см. табл. 3).

При выборе или изготовлении ШПО следует учитывать следующий важный фактор. Оптимальный размер поля зрения необходимо адекватно сочетать с имеющимся математическим обеспечением. Технически легче изготовить светосильную оптику с полем зрения десяткисотни квадратных градусов, чем разработать алгоритм и программное обеспечение, способное апостериорно, оперативно (несколько секунд на фрейм) и с максимально возможной степенью вероятности производить селекцию КО на участке изображения звездного неба, содержащего несколько тысяч звезд. Задача создания оперативного, «умного» алгоритма обработки ПЗС-изображения крайне сложна. Ввиду отсутствия достоверных моделей такого типа изображений, невозможно с высокой надежностью на первоначальном этапе на фоне многочисленных арте-

фактов программно выделить малоконтрастные, малоразмерные (соизмеримые с размером пиксела) изображения КО [2]. Достоверность автоматизированного выделения также снижают многочисленные случайные помехи от «космических частиц», разного рода шумов, величина которых в фрейме также соизмерима с размером изображения КО. В итоге программное выделение КО может затянуться на длительное время [http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv10i3.pdf]. Для повышения вероятности селекции КО можно предложить увеличение количества фреймов в серии.

Очевидна перспективность использования ШПО для следующих задач мониторинга околоземного космического пространства.

1. Обнаружение высокоорбитальных КО, имеющих блеск до  $16^m$ . На базе ШПО с полем зрения несколько десятков квадратных градусов реально проводить обзор узкого геостацио-

Таблица 1. Характеристики объективов с использованием ПЗС-камеры IMG1001E

Характеристика	«Зенитар-М»	«Гелиос-40»	ОФ-233	«ВариоГоир Т-1-М»	«Уран-9»	«Таир-19»
$D$ , мм	35	55	85	140	100	170
$f$ , мм	50	85	210	40—400	250	500
$f/D$	1.7	1.5	2.5	4	2.5	3
Разрешение, "/пкл	99	56	23	12—124	19.8	9.9
Поле зрения	30×30°, 900 град <sup>2</sup>	16.4×16.4°, 270 град <sup>2</sup>	6.7×6.7°, 45 град <sup>2</sup>	от 3.5×3.5° до 35.4×35.4°, от 12.4 до 1244 град <sup>2</sup>	5.2×5.2°, 27 град <sup>2</sup>	3×3°, 9 град <sup>2</sup>
Проницательная способность по звездам ( $t = 1$ с)	$11^m$	$12^m$	$13.5^m$ — $13.9^m$	$11.5^m$ — $12^m$	$13^m$	$14^m$
Оптимальная $T_{\text{нак}}$ для обнаружения ГСС	30—40 с до $12.5^m$	20—30 с до $13.5^m$ — $14^m$	15—20 с до $14^m$	10—15 с до $12.5^m$	10—15 с до $14.3^m$	10 с до $15.5^m$

Таблица 2. Оптимальные характеристики малоразмерной линзовой ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации ГСС (с использованием ПЗС IMG 1001E)

$D$ , мм	$f/D$	Разрешение, "/пкл	Поле зрения	Оптимальное $T_{\text{накоп}}$ для обнаружения ГСС	Проницательная способность по звездам
150—220	1:2—1:3.5	20—10	5×5°—3×3°	10—15 с	$13^m$ — $14^m$ за 1 с накопления

Таблица 3. Оптимальные характеристики линзовой малоформатной ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации НОКО

$D$ , мм	Относительное отверстие $f/D$	Угловое разрешение, "/пкл	Поле зрения	$m_{\text{max}}$
90—150	1:1.2—1:2	50—70	40×40°—50×50°	$12^m$ — $13^m$ (за 1 с)



- нарного кольца в контролируемой зоне пункта наблюдения ( $110^\circ$ — $130^\circ$ ) в течение 1—2 ночей.
2. Выполнение целевых наблюдений для анализа возможных опасных сближений КО с фрагментами космического мусора, выявление маневров ГСС.
  3. Обнаружение комет, регистрация метеоров, астероидов, опасно сближающихся с Землей. Выявление нестационарных во времени и пространстве астрофизических объектов (оптические транзиенты, вспыхивающие, новые, сверхновые звезды).

Широкопольная оптика с полем зрения сотни-тысячи град<sup>2</sup> позволит в течение ночи обнаруживать несколько сотен прохождений НОКО с вычисляемой ошибкой орбитальных параметров, достаточной для уверенного отождествления и прогнозирования движений НОКО.

Большой интерес для обзорных наблюдений ГСО представляют следующие светосильные отечественные объективы [5].

«Уран-16 750/3.5». Фокальная плоскость объектива рассчитана для использования фотоприемника размером  $30 \times 30$  см,  $D = 22$  см,  $f/D = 3.5$ , разрешающая сила — в центре 35 лин/мм, по полю 12 лин/мм,  $F = 750$  мм.

«Уран-12 500/2.5». При размере фотоприемника  $18 \times 24$  см поле зрения составляет  $33^\circ$ ,  $D = 20$  см,  $f/D = 2.5$ , разрешающая сила — в центре 38 лин/мм, по полю 11 лин/мм,  $F = 500$  мм.

**Преимущества использования линзовой широкопольной оптики.** Используется «готовая к употреблению» оптика. Для астрометрических работ, как известно, предпочтительней использовать рефракторы. Оптическая скамья проста в настройке и изготовлении. Недорогостоящие широкоугольные объективы (фото-, кино-, проекционные, специальные и др.) дают качество изображения, вполне удовлетворяющее требованиям задач мониторинга космического пространства.

К недостаткам следует отнести трудность фокусировки с объективами, имеющими относительное отверстие 1:1.2—1:2. Хроматическая аберрация, различного рода искажения присущи некоторым линзовым объективам (за исключением апохроматов), но они постоянны во времени, их можно исследовать и учитывать программно.

*Авторы выражают признательность А. В. Сергееву (МЦ АМЭИ, Терскол), Н. З. Стрыгину (АО ОНУ, Одесса), А. В. Багрову (ИНАСАН, Москва) за ценные замечания и советы при обсуждении материала.*

1. Багров А. В., Бескин Г. М., Бирюков А. и др. Широкоугольная высокоскоростная оптическая камера для обнаружения вспыхивающих и движущихся объектов // Окоземная астрономия-2003: Сб. тр. — М., ИНАСАН, 2003. — Т. 2. — С. 101—106.
2. Прокофьева-Михайловская В. В., Стрыгин Н. З., Сухов П. П., Карпенко Г. Ф. Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС) для наблюдений за искусственными спутниками Земли // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — **103**. — С. 238—245.
3. Теребиж В. Ю. Зеркально-линзовые телескопы дифракционного качества со сферическими поверхностями // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2001. — **97**. — С. 101—103.
4. Цветов Ю. П. Инструменты для оптических наблюдений искусственных спутников Земли // Наблюд. искусств. небес. тел. — 1976. — № 72. — С. 23—60.
5. Яковлев А. Ф. Каталог «Объективы» / Под ред. Д. С. Волосова. — М.: ОНТИ ГОИ, 1970. — Т. 1, 2.
6. Pravdo S. H., Rabinowitz D. L, Helin E. F., et al. An automated system for telescope control, wide-field imaging, and object detection // Astron. J. — 1999. — **117**. — P. 1616—1633.

*Надійшла до редакції 30.10.09*

*P. P. Sukhov, S. K. Volkov, G. F. Karpenko*

#### THE USE OF THE WIDE-FIELD LENS OPTICS FOR SPACE SURVEILLANCE SYSTEMS

On the basis of our observation results, it is shown that wide-field lens optics can be used for the monitoring of high-orbital artificial Earth's satellite objects with the aim of their orbital determination. With the wide-field lens optics «Tair-19 500/3», at a limited magnitude of  $15.5^m$  in an accumulation time of per 10 sec, the rms error for the coordinate measurements in the case of geostationary satellites moving slowly does not exceed 2 arcsec. For about 90 % measurements, the rms error is less than 1 arcsec. All of active 46 catalogued geostationary satellites with declinations less than  $2.5^\circ$  were detected during the survey of the geostationary zone from  $10^\circ$  E to  $37^\circ$  W (the zone width was  $5^\circ$  and zone area was  $500 \text{ deg}^2$ ). The possibility to use wide-field optics for the monitoring of LEOs with altitudes up to 2000 km is shown. Among the 39 objects observed during 1 hour in the «beam-park» mode with a field of view of  $30^\circ \times 30^\circ$  35 objects were identified in the NO-RAD catalogue.

УДК 550.38

**В. Корепанов<sup>1</sup>, А. Марусенков<sup>1</sup>, С. Беляєв<sup>1</sup>, С. Клімов<sup>2</sup>, Л. Зелений<sup>2</sup>,  
Д. Новіков<sup>2</sup>, Ч. Ференц<sup>3</sup>, Я. Ліхтенбергер<sup>3</sup>, Л. Боднар<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України

<sup>2</sup> Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва, Росія

<sup>3</sup> Університет імені Етвоша, Будапешт, Угорщина

<sup>4</sup> Підприємство «BL-Electronics Kft.», Шольмар, Угорщина

## **ХВИЛЬОВИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ НА МІКРОСУПУТНИКУ «ЧІБІС-М»**

*Дослідження процесів, які відбуваються під час розрядів блискавки, є актуальним завданням космічної фізики. Саме на це спрямований експеримент на борту мікросупутника «Чібіс-М» (запуск у 2010 р.), який містить два набори космічної апаратури: «Гроза» та «Хвильовий комплект». Від цього проекту очікуються особливо цікаві результати, оскільки вперше заплановані не тільки прямі спостереження блискавок, але й одночасні дослідження викликаних ними хвильових процесів (дослідження проводимуться як з борту супутника, так і зі станцій наземної підтримки), що дасть безпрецедентну нагоду спостерігати розвиток блискавкового механізму від виникнення до дисипації в формі електромагнітних хвиль. У межах електромагнітного експерименту на борту мікросупутника «Чібіс-М» будуть проведені вимірювання електричного й магнітного полів та густини електричного струму. Особлива увага сконцентрована на ННЧ-ДНЧ-діапазоні. Ці хвилі відіграють головну роль у взаємодії в системі «магнітосфера — іоносфера — атмосфера — літосфера», і їхні дослідження необхідні для розкриття механізму цієї взаємодії. У роботі описані наукові завдання проекту та склад бортової апаратури «Хвильовий комплект».*

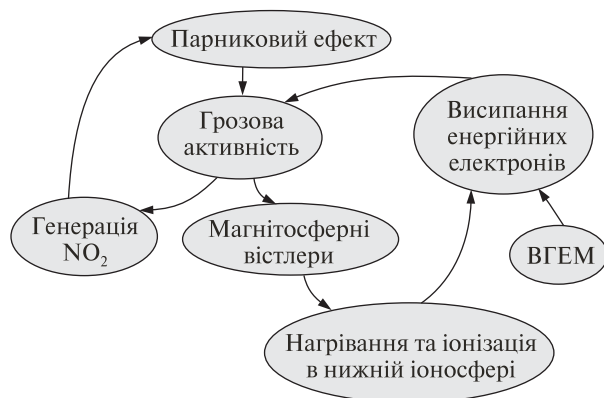
### **ВСТУП**

Спостереження й моніторинг земного оточення відіграють важливу роль у дослідженнях дуже складної системи життєдіяльності на нашій планеті. Головними напрямками дослідження Землі є вивчення сили тяжіння та магнітного поля, атмосферного вітру, опадів і температурного поля, кріосфери й льодового покриття, біосферно-атмосферного взаємозв'язку, взаємодії хмар і випромінювань, стратосферно-тропосферного взаємовпливу та створення нових комплексних моделей цих процесів. Перелічені напрями тільки частково відображають предмет необхідних досліджень, до яких має долучатися комплексний аналіз плазмового й електромагнітного (ЕМ) довкілля Землі, що є ключовим елементом, який відображає функціонування системи Сонце — Земля. Якщо ми збираємось збагнути спосіб функціонування всієї системи, то повинні дослідити (спостерігати, змоделювати і зрозуміти) саме наше плазмове й ЕМ-довкілля, тоб-

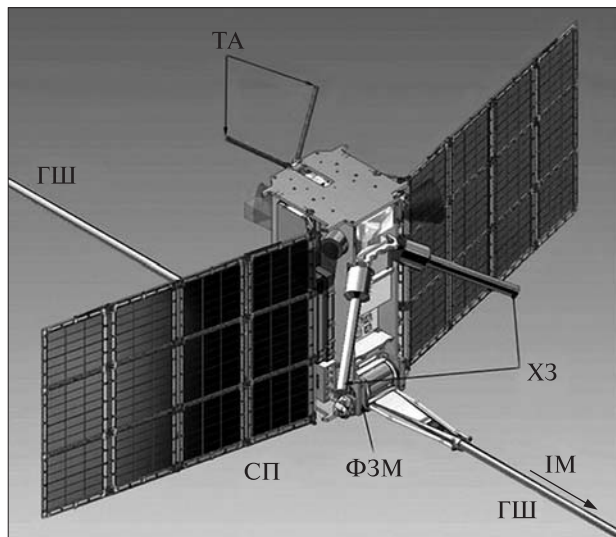
то динаміку верхньої атмосфери і її взаємодію з міжпланетним простором та нижньою атмосферою. Результати дослідження плазмосферних ефектів, які часто мають антропогенне чи приповерхнє походження, необхідні для аналізу глобальних змін у цій системі.

Явища, викликані природними або антропогенними чинниками, що виникають та поширюються у плазмі верхньої атмосфери, сильно впливають на навколишнє середовище. Наприклад, рис. 1 відображає можливий механізм впливу випромінювання гармонік електричних мереж (ВГЕМ) на активність блискавкових розрядів. Отже, розгляд ЕМ-активності у міжпланетному просторі й навколо Землі є ефективним засобом вивчення стану системи «магнітосфера — іоносфера — атмосфера — літосфера». Ми маємо досвід попередніх «пілотних проектів», наприклад експерименти на борту ІК-24 («Активний») та супутника «Компас-2» [16, 26], результати яких підтвердили важливість такого моніторингу. Розглядаючи результати проектів «Кластер» [32] та «Деметер» [30], ми знаходимо не тільки підтвердження відомих явищ, але й

© В. КОРЕПАНОВ, А. МАРУСЕНКОВ, С. БЕЛЯЄВ,  
С. КЛІМОВ, Л. ЗЕЛЕНИЙ, Д. НОВІКОВ, Ч. ФЕРЕНЦ,  
Я. ЛІХТЕНБЕРГЕР, Л. БОДНАР, 2010



**Рис. 1.** Схема можливого впливу випромінювання гармонік електричних мереж (ВГЕМ) на активність блискавок. Стрілка з'єднує відомі, але не оцінені кількісно процеси [28]



**Рис. 2.** Загальний вигляд мікросупутника «Чібіс-М»: ХЗ — хвильовий зонд, ФЗМ — ферозондовий магнітометр, ГШ — гравітаційні штанги, ІМ — індукційний магнітометр, ТА — телеметрична антена, СП — сонячні панелі. Загальна вага мікросупутника з системами обслуговування і науковим корисним навантаженням — 40 кг

спостерігаємо декілька нових, неочікуваних і не відомих раніше ефектів. Неперервне дослідження ЕМ-довкілля Землі за допомогою супутників допомагає зрозуміти й узагальнити інформацію про природу явищ, які впливають на комплекс земних систем. Поєднання систематичного ЕМ-

моніторингу, прицільно виконуваного з космічних супутників, з наземною підтримкою є особливо ефективним [25, 33].

Дослідження універсальних законів, які керують перетворенням та дисипацією хвильової енергії плазми у магнітосферно-іоносферній системі, є головною фундаментальною проблемою хвильового експерименту на борту МС «Чібіс-М» (рис. 2). В його рамках планується виконати такі дослідження [5, 25, 36].

1. Вимірювання *in situ* флуктуацій електричного й магнітного полів, параметрів термічної та епітермічної плазми в іоносфері поблизу шару *F* у різних геліо- та геомагнітних умовах.

2. Реєстрація геомагнітних та геофізичних параметрів наземними обсерваторіями з різними часовими масштабами.

3. Дослідження ЕМ-явищ (спектрів ННЧ/ДНЧ-хвиль) у різних ділянках навколосемного простору шляхом порівняльного аналізу вимірювань ЕМ-хвиль, виконуваних одночасно різними космічними апаратами та наземними геофізичними станціями.

## ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Відомо, що довгохвильове ЕМ-випромінювання активно використовується для дослідження процесів у космічній плазмі, і ці хвилі мають там таке ж значення, як сейсмічні хвилі для досліджень будови Землі. Якщо порівняти їхню роль з роллю ЕМ-процесів у інших ділянках фізики, то хвилі у плазмі мають деякі характерні відмінності. Особливо важливими є ефекти резонансу, які виникають внаслідок взаємодії хвиль і частот, перетворення мод, утворення резонаторів і хвилеводів. Саме через ефект резонансу ННЧ-хвилі несуть важливу інформацію про динамічні явища в навколосемному просторі та верхній атмосфері. Ці хвилі досягають досить високих амплітуд, що спричиняє їхній помітний вплив на потоки плазми й ефективне прискорення електронів у магнітосфері.

Дослідження природи й структури ЕМ-явищ у ННЧ-ДНЧ-діапазонах, які виникають у плазмосфері навколо Землі, дають нам багато інформації. Мета хвильового експерименту — отрима-

ти детальні знання про ЕМ- та плазмові явища, які виникають у плазмосфері Землі, збагнути механізми взаємодії в доквіллі земної кулі та ефекти, викликані господарською діяльністю, які суттєво впливають на стан цілої навколоземної плазмової оболонки [31]. Так, поширення «спрайтів» (викликаних грозами видимих перехідних явищ у верхній атмосфері у вигляді потоків заряджених часток, які рухаються вгору) залежить від плазмосферної ДНЧ-активності природного або антропогенного походження та від забруднення нижньої атмосфери. Іншим прикладом може бути випромінювання потужних КХ-передавачів, яке локально підвищує рівень іонізації нижньої атмосфери — найнижчої частини плазмосфери. Варіації розподілу заряджених часток змінюють структуру струму в іоносфері, а ці струми, в свою чергу, можуть впливати на біосферу [27]. Підсумовуючи стан перелічених вище напрямів дослідження, можемо ствердити, що вони є надзвичайно важливі для розуміння системи функціонування Землі, наші знання про яку далеко не достатні. ЕМ-явища в ННЧ-ДНЧ-діапазоні дуже залежать від структури іонізованих середовищ, у яких вони відбуваються. Саме структура середовищ та їхні передавальні функції формують базовий комплект граничних умов, які забезпечують життя на Землі (іоносфера, плазмосфера, радіаційні пояси та ін.), механізми обміну енергією між атмосферою Землі, міжпланетним середовищем та Сонцем [9, 28, 34], викликають періодичні й тимчасові явища у біосфері [2, 7, 27 та ін.], що відбуваються шляхом відомого енергетичного зв'язку або невідомих ефектів, які, в свою чергу, впливають на стабільність вуглецевих сполук. Більш або менш тривале нагромадження інформації шляхом реєстрації та порівняльної інтерпретації ННЧ-ДНЧ ЕМ-явищ (вістлерів, сигналів нерегулярної форми, коротких імпульсів [13, 15, 29 та ін.] і поєднання цих вимірювань з одночасними дослідженнями рухомих неоднорідностей [11, 12, 14, 18] повинні дати необхідні знання про множину граничних умов, потрібних для стійкого життя на Землі. Застосовуючи такий підхід, ми можемо визначити домінантні ефекти в динаміці верхньої атмосфери та у впливі на неї міжпланетних

і сонячних подій. Останні особливо важливі через їхню роль у формуванні космічної погоди та радіаційної небезпеки. Наша цивілізація дуже чутлива до стабільності біологічних і соціальних умов. Чинники космічної погоди можуть згубно впливати на галузь космічної служби та наземної технічної інфраструктури, а також відображатися у деяких аспектах біосфери (наприклад, викликати зсув вегетативних параметрів [7]).

Джерела природних електромагнітних і споріднених з ними сигналів у плазмосфері пов'язані в основному з динамікою Землі, Сонця і, в рідкісних випадках, з міжпланетними процесами. Вони складають два головні класи. Основна частина джерел, розташованих в атмосфері (не тільки в тропосфері), таких як електричні розряди й близькі до них явища (наприклад, блискавки, спрайти), належить до природних. Інший вагомий за кількістю вид складають антропогенні джерела, розташовані на межі атмосфери й твердої Землі, де функціонує наша цивілізація. Вони викликають ЕМ-явища двома способами: безпосереднім ЕМ-випромінюванням та зміною стану атмосфери і її верхньої частини — плазмосфери (наприклад, вказаний вище зв'язок між посиленням появи спрайтів і ступенем забруднення). Виявлено, що активність земної кори також є джерелом ЕМ-сигналів [17]. Отже, важливо вивчати ці процеси не тільки для створення загальної моделі Землі як системи, а й для контролю природних небезпек (вулканічна або сейсмічна активність і таке ін.). Крім того, краще розуміння механізму утворення джерел ЕМ-сигналів у літосфері Землі також допоможе пізнати динаміку розвитку нашої планети. Отже, тривалий моніторинг і вивчення структури ЕМ-довкілля Землі відкриває можливість знаходити індикатори літосферної динаміки (сейсмічності), а також допомагає детально вивчати надра Землі та розвивати нові технології спостереження за Землею. Звідси ж впливають і нові дані про просторово-часовий розподіл атмосферних розрядів та поширення енергії, які підвищують надійність і точність моделей атмосфери. Так, вивчення глобальної грозової активності показало, що частота блискавок може бути засобом для виявлення глобальних змін. Рис. 3 відображає зв'язок між



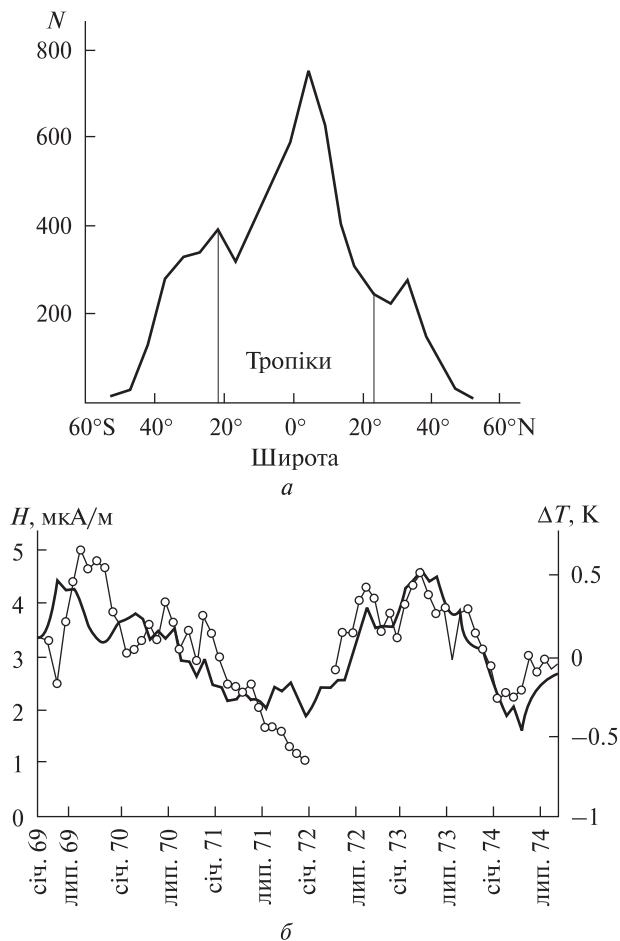


Рис. 3. а — залежність кількості  $N$  грозових спалахів від географічної широти [35], б — зв'язок між магнітним полем  $H$  шуманівських гармонік і температурними аномаліями  $\Delta T$  поблизу екватора

зростанням температури і грозовою активністю. До того ж, з'являється ще один важливий аспект: доведено, що ЕМ-сигнали можуть генеруватись не тільки коровими енергетичними джерелами, а й «рухомими градієнтами», коли джерело переходить з одного стану в інший. Ці градієнти можуть бути енергетично пов'язані з високою густиною енергії і продукувати сигнали в ННЧ-ДНЧ-діапазоні.

На сьогодні в ряді країн заплановані космічні експерименти, спрямовані на вивчення хвильової ННЧ-ДНЧ-активності в іоносфері. Деякі з них вже реалізовані, наприклад, широко відомі

експерименти на супутниках «Деметер» (Франція) [8], «Компас-2» (Росія) [24] та «Січ-1М» (Україна, експеримент «Варіант») [3].

### ХВИЛЬОВИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ НА БОРТУ МІКРОСУПУТНИКА «ЧІБІС-М»

Головним завданням основного комплексу наукової апаратури «Гроза» мікросупутника «Чібіс-М» є дослідження ступеневого процесу висотних розрядів у великих електричних полях [25]. Додатковий комплекс «Хвильовий комплект» (ХК) не бере участі у процесі реєстрації власне «події» — процесу розряду, але бортовий процесор ХК (ПСА) використовуватиме створюваний апаратурою «Гроза» строб для «прив'язування» до розряду блискавки моменту генерації ЕМ-хвиль у діапазоні  $10^{-2} \dots 2 \cdot 10^4$  Гц (ННЧ-ДНЧ). У цьому діапазоні з супутників вже давніше спостерігалось та реєструвалось тільки ЕМ-випромінювання, генероване в основній фазі блискавкового розряду, т. зв. вістлери. Саме тому, що це ЕМ-випромінювання генетично пов'язане з розрядами блискавки, його дослідження входить в основні завдання проекту «Чібіс-М».

Значний обсяг експериментального матеріалу, очікуваного з МС «Чібіс-М» та геофізичних наземних обсерваторій супроводження цього експерименту, його теоретичний аналіз і комп'ютерне моделювання дозволять розробити алгоритм хвильової та гідромагнітної діагностики магнітосферно-іоносферної системи. Припускається, що ці методи уможливлять тривалий кількісний моніторинг характерних енергій часток, концентрації і хімічного складу плазми у магнітосфері для передбачення різних форм геомагнітних збурень, які виникають під впливом потужних факторів «зверху» (космічних) та «знизу» (терагенних). Систематичні дослідження цих зв'язків допоможуть виявити універсальні закони, які регулюють перетворення та дисипацію плазмово-хвильової енергії в магнітосферно-іоносферній системі.

Отже, хвильовий експеримент на борту МС «Чібіс-М» матиме такі головні цілі:

- дослідження процесів випромінювання та розповсюдження ЕМ-поля в просторі (навколо Землі) і в часі;



- систематична класифікація зареєстрованих ЕМ-явищ;
- виявлення й аналіз ЕМ-поля природного й антропогенного походження, визначення його можливої ролі в Земній системі;
- нагромадження інформації для розробки вдосконалених моделей плазмосфери й іонізованої верхньої атмосфери, перевірки моделей плазмового середовища та ролі, яку відіграють явища й процеси, викликані космічною погодою в цих моделях;
- виявлення терагенних сигналів і явищ, які походять з поверхні й середини Землі, та їхнього зв'язку зі штучними (ВГЕМ, вибухи) і природними градієнтами або сейсмічними явищами.

Для досягнення цих цілей необхідна скоординована одночасна робота супутника і наземних засобів підтримки, що відкриє сприятливі можливості для вивчення характерних подій у великих ділянках космосу.

#### «ХВИЛЬОВИЙ КОМПЛЕКТ»

Комплекс апаратури «Хвильовий комплект» складається з програмного аналізатора сигналів (ПСА) типу SAS-3 [16] та набору ЕМ-давачів, під'єднаних до входів ПСА. Важливо зазначити, що на Землю планується передавати хвильові форми сигналів, записуваних ПСА, що зробить можливою їхню точну апостеріорну спектрально-часову обробку. Вважається, що найефективнішими методами їхніх досліджень є одночасні вимірювання густини просторового струму (ГПС) та флуктуацій магнітного поля хвильових процесів. Можливість прямих вимірювань ГПС за допомогою щілинного зонду Ленгмюра (ЩЗЛ) підтверджена експериментально [6]. Вдосконалена модифікація ЩЗЛ була встановлена на борту супутника «Прогноз-10», і отримані результати вимірювань добре узгоджувались з розрахованими величинами [1, 4]. Подальше вдосконалення дозволило створити прилад під назвою «хвильовий зонд» (ХЗ), який є поєднанням трьох давачів у одному модулі (рис. 4): щілинного зонду Ленгмюра, індукційного магнітометра (ІМ) та електричного зонда [23]. Ця апаратура була успішно випробувана у космічному експе-



Рис. 4. Хвильовий зонд (ХЗ): зліва — захисний і випробувальний футляр, посередині — ХЗ, справа — ХЗ з футляром

рименті «Варіант» на борту українського супутника «Січ-1М», запущеного в 2004 р. [10].

Хвильовий зонд має такі основні технічні характеристики:

Частотний діапазон для всіх каналів . . . . .	0.1...40 000 Гц
Динамічний діапазон . . . . .	120 дБ
Рівень шуму у вимірювальних каналах на 1 кГц:	
густина електричного струму . . . . .	$\leq 1 \text{ пА}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$
магнітна індукція . . . . .	$\leq 0.1 \text{ пТл}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$
електричний потенціал . . . . .	$\leq 20 \text{ нВ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$
Коефіцієнт перетворення густини струму . . . . .	$77 \text{ В}\cdot\text{мА}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$
Коефіцієнт перетворення магнітного поля . . . . .	$100 \text{ мВ}\cdot\text{нТл}^{-1}$
Енергоспоживання . . . . .	0.25 Вт
Розміри . . . . .	$\varnothing 64 \times 340 \text{ мм}$
Вага . . . . .	0.35 кг

Два такі прилади будуть встановлені ортогонально один до одного на платформі МС «Чібіс-М». Щоб отримати третю складову магнітного поля, ортогонально до площини, утвореної обома ХЗ, буде встановлено окремий індукційний магнітометр ІМ, який має такі самі параметри, як і магнітний канал ХЗ. Згідно зі структурою ХК дані з ХЗ та ІМ будуть оброблені ПСА, що дозволить значно стиснути обсяг телеметричних даних.

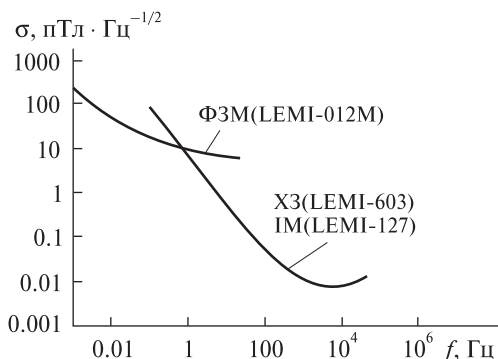


Рис. 5. Шуми  $\sigma$  ферозондового та індукційного магнітометрів



Рис. 6. Зовнішній вигляд програмного аналізатора сигналів

До складу ХК входить ще один прилад – ферозондовий магнітометр (ФЗМ) LEMI-012M. Це легкий, високочутливий прилад з низьким споживанням енергії, спеціально розроблений для мікро- та наносупутників. Він має такі параметри (визначені для всіх трьох аналогових виходів):

Діапазон вимірювання поля	$\pm 64\,000$ нТл
Коефіцієнт перетворення	$64 \pm 0.6$ мкВ·нТл <sup>-1</sup>
Частотний діапазон	0...10 Гц
Рівень шуму на 1 Гц	$\leq 10$ пТл·Гц <sup>-1/2</sup>
Енергоспоживання	$< 0.5$ Вт
Розміри:	
давач	$\varnothing 40 \times 62$
блок електроніки	$150 \times 85 \times 40$ мм
Вага:	
давач	$< 0.1$ кг
блок електроніки	$< 0.50$ кг

На рис. 5 подано перекриття між частотними діапазонами і чутливістю ФЗМ та ІМ. Як видно, їхні чутливості дозволяють досліджувати

магнітні коливання в усьому діапазоні ННЧ-ДНЧ без втрати роздільної здатності.

### РЕЄСТРАЦІЯ ЯВИЩ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ПРОГРАМНОГО АНАЛІЗАТОРА СИГНАЛІВ

Варто зазначити, що прийняте розташування давачів на МС «Чібіс-М» дає змогу проводити двокомпонентні вимірювання ГПС та векторні вимірювання магнітних складових випромінювань у ННЧ-ДНЧ-діапазонах і в постійному магнітному полі. Також буде вимірюватись і аналізуватись одна складова електричного поля з короткою базою. Основною функцією ПСА, зовнішній вигляд якого показаний на рис. 6, буде прийняття та обробка ЕМ сигналів і побудова їхніх спектрів у діапазоні 0.1 Гц...40 кГц.

У поданій нижче таблиці показані параметри вхідних сигналів, які обробляє ПСА. До того ж, ПСА запрограмований виявляти «подію» та, у випадку її виявлення, він автоматично переходить у режим швидкісної реєстрації, як це здійснювалося на борту інших супутників, таких як «Деметер» або «Компас-2».

Ми називаємо «подією» ситуацію, цікаву з точки зору наукових завдань експерименту «Чібіс-М». У випадку виявлення «події» вона записується в один з блоків пам'яті ПСА, залежно від типу явища. Хвильова форма «події» залишається у пам'яті приладу на запрограмований час, а потім передається телеметричною системою. Програмне забезпечення ПСА може працювати у кількох режимах. Зміни режимів роботи та можливість перепрограмування ПСА досягають

#### Вхідні сигнали, які обробляє програмний аналізатор сигналів

Давач	Кількість	Смуга частот	Частота опитування
Індукційний ( $B_x, B_y, B_z$ )	3	0.1 Гц...40 кГц	100 кГц
Електричний ДНЧ ( $E = E_2 - E_1$ )	1	0.1 Гц...40 кГц	100 кГц
Хвильовий ( $I_1, I_2$ )	2	0.1 Гц...40 кГц	100 кГц
Електричний ННЧ ( $E = E_2 - E_1$ )	1	DC-100 Гц	250 Гц
Магнітометр ( $BM_x, BM_y, BM_z$ )	3	DC-10 Гц	25 Гц

ються телекомандами згідно з визначеними завданнями.

Оскільки нахил орбіти МС «Чібіс-М» близький до нахилу орбіти Міжнародної космічної станції (МКС), з борту якої і планується запуск, ще одним важливим напрямом досліджень є організація узгоджених двоточкових спостережень. Вирішальним фактором у цих спостереженнях є близькість параметрів магнітно-хвильових давачів ХК на МС «Чібіс-М» та давачів експерименту «Обстановка. 1-й етап» на борту МКС [21]. Порівняно низький нахил орбіти МКС і МС «Чібіс-М» дає добру підставу для вивчення процесів космічної погоди на середніх та екваторіальних широтах [19], де грозова активність особливо висока. Ці ділянки також часто підлягають природним небезпекам, відображення яких в іоносфері буде досліджуватися двома згаданими космічними апаратами. Такі синхронні двоточкові спостереження становитимуть важливу складову програми передбачення й діагностики космічної погоди.

## ВИСНОВКИ

Вагомість завдань проекту та дієвість методів дослідження основних параметрів блискавкових розрядів були обговорені та схвалені провідними експертами світу в цій галузі з Великобританії, Франції, Чехії та США на зустрічах робочих груп Міжнародного інституту космічної науки (Берн, Швейцарія) в межах діючих та майбутніх проектів:

- супутник «Тараніс», планований до запуску ЄКА в 2011 р. і спрямований на дослідження розрядів у системі «хмара — іоносфера»,
- проект КАРНЕС (зв'язок ділянок атмосфери з навколосезним простором).

При підготовці проекту були проведені дослідження ролі високоенергетичних електронів та космічних променів у блискавкових розрядах на високогірній науковій станції Інституту фізики РАН у Тянь-Шані. Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ та НКУ (Україна) проводитиме активні експерименти з акустичного впливу на атмосферу й іоносферу під час проходження супутника «Чібіс-М» над наземною станцією з акустичним радаром.

На підставі експериментальних результатів [1, 3, 10, 24] можна також стверджувати, що розроблений ХК буде особливо ефективний для вимірювання параметрів польових та струмових структур хвиль в широкому частотному діапазоні. Результати вимірювань можуть бути ефективно використані для відновлення спектрального складу хвиль.

На борту МС «Чібіс-М» буде забезпечена висока ЕМ-чистота (ЕМЧ). Відомо, що на сучасних КА, завантажених великою кількістю радіоелектронного й електротехнічного обладнання, практично не можливо проводити ННЧ-ДНЧ-вимірювання з високою роздільною здатністю. Що більше обладнання розміщено на КА, тим вища споживана потужність КА і тим гірша ЕМЧ. Отже, ЕМ-моніторинг виявляється найефективнішим на борту МС з найменшою споживаною потужністю, такого як основна платформа МС «Чібіс-М». Згідно з технічними параметрами МС «Чібіс-М» все обладнання споживає менш ніж 50 Вт. Це створює набагато кращу ЕМЧ на борту і сприяє проведенню високочутливих хвильових вимірювань.

### Основні технічні характеристики мікросупутника «Чібіс-М»

Загальна вага	40 кг
у тому числі: наукове обладнання	12.5 кг
системи обслуговування	18.2 кг
платформа та система термозабезпечення	9.3 кг
Планова орбіта	колова з висотою 480 км та нахилом, як у МКС
Система орієнтації	електромеханічна, магнітодинамічна та гравітаційна
Похибка визначення орієнтації від давачів (зірки, Сонце) та систем GPS — GLONASS	не гірше 2°
Похибка підтримки орієнтації	± (3°...15°)
Система передачі даних:	
КА — Земля	128 кбіт/с
обсяг зберігання даних на борту	50 Гбайт
обсяг передачі даних з борту	~50 Мбайт/день
частота командного та службового радіоканалів	145, 435 МГц
частота телеметричного каналу	2.2 ГГц
Максимальний рівень бортового енергоспоживання	50 Вт

Треба зазначити, що аерокосмічно-освітня програма, започаткована МС «Колібрі» [20, 22], також буде продовжена і у межах експерименту на МС «Чібіс-М».

Розробка методичних аспектів дослідження блискавкових розрядів в атмосфері була підтримана Міжнародним інститутом космічної науки (Берн, Швейцарія) в межах проекту «КАРНЕС», а розробка хвильового комплексу — Національним космічним агентством України в межах контракту 1-05/08.

1. Вайсберг О. Л., Климов С. И., Корепанов В. Е. Измерение плотности тока на ударной волне шелевым зондом Ленгмюра // Космические исследования. — 1989. — 27, № 3. — С. 623—627.
2. Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли / Под ред. М. Н. Гневышева, А. И. Оля. — М.: Наука, 1971.
3. Корепанов В. Е., Крючков Е. И., Лізунов Г. В. та ін. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — перші результати // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 4. — С. 10—17.
4. Романов С. А., Климов С. И., Мироненко П. А. Пространственные параметры и дисперсионные отношения ОНЧ волн в околосредней ударной волне по результатам измерений на борту спутника «Прогноз-10» // Космические исследования. — 1990. — 28, № 6. — С. 903—918.
5. Angarov V. N., Gotlib V. M., Klimov S. I., et al. Investigation of atmospheric lightning discharges on the microsatellite «Chibis-M». AGU Chapman Conference on the Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere. Penn State University, State College, PA, USA, 10—14, May 2009. — P. 49.
6. Bering E. A., Kelley M. C., Mozer F. S. Split Langmuir probe measurements of current density and electric fields in an aurora // J. Geophys. Res. — 1973. — 78, N 13. — P. 2202—2213.
7. Bognár P., Ferencz Cs., Tarcsai Gy. Correlated changes in sunspot numbers and in corn and wheat fields. Annales Univ. Sci. Bp., R. Eötvös, Sec. Geophys. Meteor., 1995, 11, P. 191—206.
8. Chum J., Santolik O., Parrot M. Analysis of subprotospheric whistlers observed by DEMETER: A case study // J. Geophys. Res. — 2009. — 114. — A02307, doi:10.1029/2008JA013585.
9. Currie R. G. Distribution of solar cycle signal in surface air temperature over North America // J. Geophys. Res. — 1979. — 84. — P. 753—761.
10. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from Wave Probe instrument // Adv. Space Res. — 2009. — 43, N 12. — P. 1904—1909.
11. Ferencz Cs. Electromagnetic wave propagation: The analysis of the group velocity // Acta Technica Ac. Sci. H. — 1978. — 86, N 1-2. — P. 169—213.
12. Ferencz Cs. Electromagnetic wave propagation in moving media with special regard to frequency-shifts ('Anomalous' frequency shifts in astronomy) // Acta Technica Ac. Sci. H. — 1979—1980. — Part I.—89, N 3-4. — P. 451—471; 1979. — Part II. — 90, N 1-2. — P. 24—58; 1980. — Part III. — 90, N 3-4. — P. 303—319.
13. Ferencz Cs. Real solution of monochromatic wave propagation in inhomogeneous media // PRAMANA — J. Phys. — 2004. — 62. — P. 943—955.
14. Ferencz Cs. Exact solution of Maxwell's equations in inhomogeneous moving media // Abstract book: 3rd VERSIM Workshop 2008, Tihany, 15—20 Sept. 2008 / Eds J. Lichtenberger, Cs. Ferencz, P. Steinbach. — 2008.
15. Ferencz Cs., Ferencz O. E., Hamar D., Lichtenberger J. Whistler phenomena. Short impulse propagation. — Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.
16. Ferencz O. E., Bodnár L., Ferencz Cs., et al. Ducted whistlers propagating in higher order guided mode and recorded on board of Compass-2 satellite by the advanced Signal Analyzer and Sampler SAS2 // J. Geophys. Res. — 2009. — 114. — A03213. Doi: 10.1029/2008JA013542.
17. Hayakawa M. (Ed.). Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. — Tokyo, Terra Scientific Publishing Co., 1999.
18. Inan U. S., Platino M., Bell T. F., et al. CLUSTER measurements of rapidly moving sources of ELF/VLF chorus // J. Geophys. Res. — 2004. — 109. — Art. N A05214.
19. Klimov S. I. Researches of influence of space weather on a condition of middle latitude and near-equator ionosphere // Tenth Jubilee International Scientific Conference «Contemporary problems of solar-terrestrial influences», 20—21 November 2003, Sofia, Bulgaria. — Sofia, 2003. — P. 12—13.
20. Klimov S. I., Afanasyev Yu. V., Eismont N. A., et al. Results of in-flight operation of scientific payload on micro-satellite «Kolibri-2000» // Acta Astronautica. — 2005. — 56, N 1-2. — P. 99—106.
21. Klimov S. I., Korepanov V. Ye., Lissakov, Y. V., et al. «Obstanovka» Experiment Onboard International Space Station for Space Weather Research, Space Weather Workshop: Space Weather Applications Pilot Project, 16—18 December 2002, ESTEC, Noordwijk The Netherlands. — Proceeding, 2002.
22. Klimov S. I., Tamkovich G. M., Angarov V. N., et al. Aerospace education program realization by means of the micro-satellite // Acta Astronautica. — 2005. — 56, N 1-2. — P. 301—306.



23. *Korepanov V.* The modern trends in space electromagnetic instrumentation // *Adv. Space Res.*—2003. — **32**, N 3. — P. 401—406.
24. *Kuznetsov V. D., Ruzhin Yu. Ja., Mikhailov Yu. M., et al.* VLF experiment on the Compass 2 satellite and ground-based measurements of the seismoelectromagnetic effects on Kamchatka // 10th International Seminar «Low-frequency wave processes in space plasma» Zvenigorod, November, 12—16, 2007. — P. 6.1.
25. *Lichtenberger J., Ferencz Cs., Bodnár L., et al.* Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system. I. Automatic Whistler Detector // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**. — A12201, Doi: 10.1029/2008JA013467.
26. *Lichtenberger J., Tarcsai Gy., Pásztor Sz., et al.* Whistler doublets and hyperfine structure recorded digitally by the Signal Analyzer and Sampler on the ACTIVE satellite // *J. Geophys. Res.* — 1991. — **96**. — P. 21149—21158.
27. *Masalov A. V., Syutkina E. V.* Magnetic storms and neonatal blood pressure and heart rate chronomes // *Neuroendocrinology Lett.* — 2003. — **24**. — P. 111—116.
28. *Mitra K., Mukherji S., Dutta S. N.* Some indications of 18.6 year luni-solar and 10—11 year solar cycles in rainfall in north-west India, plains of Uttar-Pradesh and north-central India // *International J. Climatology.* — 1991. — **11**. — P. 645—652.
29. *Moullard O., Masson A., Laakso H., et al.* Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmapause // *Geophys. Res. Lett.* — 2002. — **29** (20). — P. 1975. — doi:10.1029/2002GL015101.
30. *Parrot M., Benoist D., Berthelier J. J., et al.* The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results // *Planetary and Space Sci.* — 2006. — **54**, N 5. — P. 441—455.
31. *Parrot M., Zaslavski Y.* Physical mechanisms of man made influences on the magnetosphere // *Surveys in Geophysics.* — 1996. — **17**. — P. 67—100.
32. *Pickett J. S., Santolik O., Kahler S. W., et al.* Multi-point CLUSTER observations of VLF risers, fallers and hooks at and near the plasmapause, in multiscale processes in the Earth's magnetosphere: from INTERBALL to CLUSTER // *NATO Science Book Series / Eds J-A. Sauvaud, Z. Nemecek.* — Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. — P. 307—328.
33. *Rodger M. A., Thomson C. J., Lichtenberger N. R., et al.* Total solar eclipse effect on VLF signals: Observations and modelling // *Radio Sci.* — 2001. — **36**. — P. 773—788.
34. *Schröder W.* Auroral frequency in the 17th and 18th centuries and the «Maunder minimum» // *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* — 1979. — **41**. — P. 445—446.
35. *Williams E. R.* The Schumann resonance: a global tropical thermometer // *Science.* — 1992. — **256**. — P. 1184—1187.
36. *Zelenyi L. M., Rodin V. G., Angarov V. N., et al.* Microsatellite «Chibis» — universal platform for development of methods of space monitoring of potentially dangerous and catastrophic phenomena // *Selected Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium of the International Academy of Astronautics, Berlin, April 4—8, 2005 / Eds Hans-Peter Roeser, Rainer Sandau, Arnoldo Valenzuela.* — Berlin, New York, Walter de Gruyter, 2005. — P. 443—451.

*Надійшла до редакції 20.11.09*

*V. Korepanov, A. Marusenkov, S. Belyayev, S. Klimov,  
L. Zelenyi, D. Novikov, Cs. Ferencz, J. Lichtenberger, L. Bodnar*  
WAVE EXPERIMENT ONBOARD  
THE MICROSATELLITE «CHIBIS-M»

One of the recent challenges of space physics is the study of processes taking place during lightning discharges. A dedicated microsatellite named *Chibis-M* («lapwing» in English) is under preparation for launch in 2010. It contains two space instrumentation units, namely, «Thunderstorm» and «Wave Package». A special efficiency of this project is expected because not only direct observations of lightnings, but also the synchronized study of wave processes caused by lightnings will be carried out both onboard the satellite and at ground support stations. This will give unprecedented opportunity for monitoring the development of the lightning mechanism from the lightning generation till relaxation in the form of electromagnetic waves. Measurements of electric and magnetic fields and electric current density will be performed within the framework of the wave experiment onboard *Chibis-M*. Special attention focusses on the ULF — VLF frequency range. The waves of this range play the major role in the interactions of the «magnetosphere — ionosphere — atmosphere — lithosphere» system and their study is essential for the understanding of these interactions. The project scientific goals and Wave Package onboard instrumentation are described.



УДК 524 (023)

И. П. Панфилов<sup>1</sup>, В. И. Панфилов<sup>2</sup>, А. В. Соломко<sup>3</sup>, В. Г. Михайловский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Одеська національна академія зв'язку ім. А. С. Попова

<sup>2</sup> Південне територіальне управління МТС України, Одеса

<sup>3</sup> Одеський філіал Українського державного центру радіочастот

<sup>4</sup> МТС України, Київ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА РАДИОСИГНАЛОВ ОТ КОРРЕСПОНДЕНТОВ С ВЗАИМНО НЕИЗВЕСТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ В КОСМОСЕ

*Приводятся результаты вероятностной оценки поиска радиосигналов корреспондентов с взаимно неизвестным расположением. Получены формулы вероятности обнаружения хотя бы одного корреспондента с неизвестными координатами и среднего их числа, которые могут быть обнаружены приёмной системой с заданными параметрами. Показано, что даже многократное повторение серий наблюдений с использованием известных методик не позволяет увеличить вероятность их обнаружения до какого-нибудь приемлемого с практической точки зрения уровня. Это означает практическую невозможность обнаружения сигналов от корреспондентов такого типа на космических расстояниях при общепринятом подходе без существенного, на 5–10 порядков, увеличения временных и/или материальных затрат при организации измерений, что обуславливает необходимость разработки принципиально новой стратегии поиска.*

### СУТЬ ПРОБЛЕМЫ И АКТУАЛЬНОСТЬ

Целый ряд практических задач космической радиосвязи сводится к проблеме организации радиоканала между корреспондентами, не имеющими информации о взаимном пространственном положении в той или иной системе координат в условиях крайне жестких ограничений на энергетику канала связи вследствие значительных расстояний между корреспондентами.

Характерными примерами задач, сводящихся к указанной постановке, являются:

- установление (восстановление) связи и управления космическими объектами после потери ими пространственной ориентации;
- поиск и идентификация сигналов космических объектов при отсутствии достоверной информации об их технических параметрах и назначении;
- комплекс проблем поиска радиосигналов внеземных цивилизаций (ВЦ) — проблемы SETI и др.

Последняя задача может выступать как модельная в этом ряду, так как что при ее решении

все проблемы, связанные с организацией канала с потенциальным корреспондентом, проявляются в наиболее сложных условиях. Действительно, при поиске радиосигналов ВЦ приходится рассчитывать на наихудшие из возможных условий:

- расстояния между корреспондентами — галактического масштаба (единицы — сотни световых лет);
- полная неопределенность в вопросах возможного размещения потенциальных корреспондентов (опять же, как минимум, в масштабе Галактики);
- отсутствие каких-либо данных о количестве корреспондентов, используемых технических средствах и их параметрах.

В связи с вышесказанным представляет интерес анализ именно этой задачи.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

*Исходные посылки.* Необходимо разработать математическую модель, описывающую количественные характеристики (критерии) эффектив-

© И. П. ПАНФИЛОВ, В. И. ПАНФИЛОВ, А. В. СОЛОМКО,  
В. Г. МИХАЙЛОВСКИЙ, 2010

ности поиска радиосигналов ВЦ. Она должна базироваться на общепринятых, установленных научно-технических данных (общие принципы радиосвязи, строение Галактики, математические модели распространения радиоволн, антенно-фидерных устройств, радиотехнических устройств обработки сигналов и т. п.), коррелировать с опубликованными данными и подтверждаться многолетней практикой и результатами ранее реализованных проектов SETI [1—9].

При построении расчетной модели будем использовать следующие исходные данные.

1. Информация о строении Галактики. Предполагается, что геометрическая форма нашей Галактики может быть приближена эллипсоидом вращения с главными полуосями  $R_g = 50000$  световых лет (св. лет) и  $H_g = 750$  св. лет. Солнечная система (точка наблюдения и приема сигналов ВЦ) расположена в средней зоне Галактики на расстоянии около 30000 св. лет от ее центра и 30 св. лет от экваториальной плоскости. Распределение звезд в первом приближении равномерно в объеме эллипсоида. Межзвездная среда в целом изотропна, однородна, затухание в среде вследствие потерь при распространении электромагнитных волн пренебрежимо мало.

2. Информация о потенциальных источниках сигналов ВЦ. Количество ВЦ с уровнем технологического развития, достаточным для организации информационных радиоканалов связи в галактических масштабах, определяется формулой Дрейка и далее обозначено как  $N$ . Цивилизации в Галактике распределены случайно, по равномерному закону с постоянной объемной плотностью распределения:

$$\rho = \frac{N}{V_g}, \quad (1)$$

где  $V_g$  — объем эллипсоида, (св. лет)<sup>3</sup>.

3. Информация о применяемых при организации радиосвязи технических средствах и методиках установления связи. Предполагается, что информационные сигналы ВЦ должны быть как минимум нашего уровня развития технологий, но не радикально более развитыми, прежде всего по энерговооруженности. Для расчета энергетики применяется стандартная модель радиоканала:

передающая система, среда распространения, приемная система.

Передающая система ВЦ включают радиопередатчик мощностью  $P_t$  (подстрочный индекс  $t$  везде далее относится к передающей стороне радиоканала) с полосой частот излучения  $\Delta f$  на длине волны  $\lambda$  и передающую антенну с изотропным коэффициентом усиления  $G_{tmax}$ .

Приемная система на Земле включает приемную антенну с изотропным коэффициентом усиления  $G_{rmax}$  (подстрочный индекс  $r$  везде далее относится к приемной стороне радиоканала) и приемник с суммарной шумовой температурой по входу  $T_\Sigma$ . Далее для простоты предполагается, что полосы частот приема и передачи совпадают.

Передающая и приемная антенны предполагаются остронаправленными, с осесимметричными относительно направления максимального излучения  $\theta_{max}$  диаграммами направленности, аппроксимируемыми кусочно-постоянными функциями вида

$$G(\theta) = \begin{cases} G_{max}, & \theta \in [\theta_{max} - \Delta\theta/2; \theta_{max} + \Delta\theta/2], \\ 0, & \theta \notin [\theta_{max} - \Delta\theta/2; \theta_{max} + \Delta\theta/2], \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta\theta$  — ширина диаграммы направленности по половинной мощности.

Для остронаправленных антенн подобного типа с высокой точностью выполняется приближенное соотношение между шириной диаграммы направленности и максимальным коэффициентом усиления:

$$G_{max} = 10/\Delta\theta^2 \quad (3)$$

при условии, что ширина диаграммы направленности измеряется в радианах.

**Критерии эффективности поиска сигналов.** В предположениях, изложенных выше, расчет энергетики радиоканала показывает, что при современных (либо даже достижимых в обозримом будущем) технологиях спорно рассматривать для задач межзвездной радиосвязи системы с ненаправленными и слабонаправленными антеннами. В этом случае при любых разумных допущениях о мощностях передатчиков ВЦ и достигнутой чувствительности наших приемников дальность связи недостаточна даже для контакта с ближайшими звездными системами.

В условиях же применения остронаправленных антенн с узкими игольчатыми диаграммами неизбежно встает вопрос о пространственной ориентации максимума излучения. При отсутствии у корреспондентов информации о взаимном расположении, ориентация антенн осуществляется в соответствии с некоторой принятой стратегией, например в виде последовательного обзора всего пространства, или перебора некоторых приоритетных направлений, или хаотичного поиска в случайных направлениях. Различными программами в рамках проектов SETI на Земле были реализованы подобные варианты стратегий.

Тем не менее, при любой выбранной стратегии ориентации передающей антенны и при отсутствии данных о месторасположении корреспондента на приемной стороне усиление передающей антенны представляет собой случайную величину, распределенную по некоторому вероятностному закону в диапазоне величин от 0 до  $G_{\max}$ . Тогда максимальная дальность обнаружения  $R$  сигналов ВЦ также является случайной величиной со своей плотностью распределения вероятности  $f(R)$  в диапазоне от 0 до  $R_{\max}$ .

Кроме того, естественно, количество ВЦ, которые могут оказаться в зоне обнаружения, также является случайной величиной.

Таким образом, учет вероятностного характера связи при отсутствии *a priori* достоверной информации о корреспонденте неизбежно приводит к необходимости использования соответствующих корректных вероятностных численных критериев эффективности поиска ВЦ.

Наиболее подходящими для построения критериев представляются следующие очевидные и наглядные величины.

1. Вероятность  $W$  обнаружения хотя бы одной ВЦ приемной системой с заданными параметрами.

2. Среднее количество  $M$  (математическое ожидание) ВЦ, которые могут быть обнаружены приемной системой с заданными параметрами.

Дальнейшее рассмотрение основано на расчете именно этих величин для оценки и сравнения применяемых и предлагаемой методик поиска сигналов ВЦ.

**Основные расчетные соотношения.** При заданных параметрах приемной и передающей систем потенциальных корреспондентов дальность обнаружения их сигналов может быть определена через известное основное уравнение радиолонии [7]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (4)$$

где  $P_r$  — мощность сигнала на входе радиоприемного устройства,  $G_{r,t}$  — коэффициенты усиления приемной и передающей антенн корреспондентов в направлении друг на друга.

Максимальная длина радиоканала (дальность обнаружения сигнала) определяется из условия, что мощность сигнала на входе приемника достигает минимально допустимого уровня, обусловленного в конечном итоге величиной чувствительности (шумовой температуры) приемного устройства.

Граничное условие обнаружения сигнала приемником, как известно, может в достаточно общей форме быть записано как [8]:

$$T_r = T_\Sigma / \sqrt{\tau \cdot \Delta f}, \quad (5)$$

где  $T_r$  — эквивалентная шумовая температура сигнала,  $\tau$  — время наблюдения.

Из выражений (4) и (5) следует, что в общем случае максимальная дальность приема равна

$$R_{\max} = \frac{5\lambda}{2\pi\Delta\theta_r\Delta\theta_t} \sqrt{\frac{P_t}{kT_\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\Delta f}}, \quad (6)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Таким образом, при поиске в определенном фиксированном направлении сигнал ВЦ с заданными параметрами будет обнаружен только в том случае, если его источник находится внутри конической области с углом раскрытия  $\Delta\theta_r$  и некоторым радиусом  $R$ . Физический объем зоны обнаружения такой формы равен

$$V(R) = \frac{4}{3} \pi R^3 \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_r}{4} \right). \quad (7)$$

Дальность приема в значительной степени обусловлена факторами, которые зависят только от ВЦ, а именно мощностью передатчика и коэффициентом усиления передающей антенны в направлении на Землю. Мощность передатчика не является определяющим фактором в предпо-

ложении достаточной технической развитости ВЦ, а вот влияние величины усиления передающей антенны ВЦ является принципиальным.

Выше было отмечено, что при отсутствии информации о взаимном расположении корреспондентов усиление передающей антенны ВЦ в направлении на приемную антенну представляет собой случайную величину. Очевидно также, что размеры и объем зоны обнаружения вследствие этого также случайны.

Если диаграмма направленности передающей антенны описывается соотношением (2), то величина коэффициента усиления антенны в направлении на корреспондента может принимать только два значения: 0 и  $G_{\max}$ , а плотность распределения вероятности величины  $R$  задается выражением:

$$f(R) = W_0 \delta(R) + W_{\max} \delta(R - R_{\max}). \quad (8)$$

Здесь  $\delta(R)$  — дельта-функция Дирака,  $W_{\max}$  — вероятность попадания приемной антенны в основной лепесток диаграммы направленности передающей антенны,  $W_0$  — вероятность непопадания приемной антенны в основной лепесток диаграммы направленности передающей антенны.

Если параметры передающей антенны соответствуют высказанным выше предположениям, а ее ориентация в пространстве равновероятна в полном телесном угле, то величина  $W_{\max}$  в (8) равна отношению площади шарового сегмента с углом раскрытия в основании  $\Delta\theta_t$  к площади сферы:

$$W_{\max} = \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_t}{4}\right), \quad (9)$$

а величина  $W_0$  дополняет ее до единицы:

$$W_0 = \cos^2\left(\frac{\Delta\theta_t}{4}\right). \quad (10)$$

Для реальной диаграммы направленности выражение для плотности распределения вероятности  $R$  превращается в некоторую непрерывную функцию в диапазоне от 0 до  $R_{\max}$ .

Получим численную оценку эффективности поиска радиосигналов ВЦ в одном фиксированном направлении. Для этого рассчитаем вероятность  $W$  обнаружения хотя бы одной ВЦ приемной системой с заданными параметрами.

Если в объеме Галактики  $V_g$  случайным образом равномерно распределены  $N$  ВЦ, то вероятность того, что в зону обнаружения объемом  $V(R)$  попадет хотя бы одна из них, очевидно, выражается формулой

$$W(R) = 1 - \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^N. \quad (11)$$

Учитывая то, что объем зоны обнаружения  $V(R)$  является также случайным по приведенным выше соображениям, для определения  $W$  применим интегральную оценку полной вероятности в виде

$$W = \int_0^{R_{\max}} f(R) \left[1 - \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^N\right] dR. \quad (12)$$

Подставив (7)–(10) в (12), окончательно получим

$$W = \left[1 - \left(1 - \frac{4}{3} \pi \frac{R_{\max}^3}{V_g} \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_r}{4}\right)\right)^N\right] \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_t}{4}\right). \quad (13)$$

Численную оценку эффективности поиска радиосигналов ВЦ в одном фиксированном направлении получим другим способом, для чего рассчитаем математическое ожидание  $M$  количества ВЦ, которые могут быть обнаружены приемной системой с заданными параметрами.

Количество ВЦ, попадающих в зону обнаружения объемом  $V(R)$ , очевидно, также является случайной величиной, только дискретной, принимающей любые целые значения  $n$  в диапазоне от 0 до  $N$ , и распределенной биномиально.

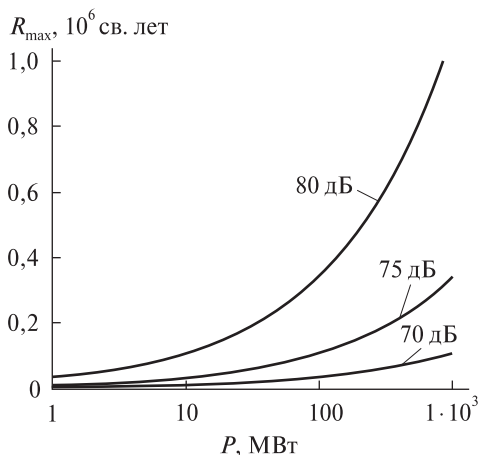
Вероятность реализации определенного значения  $n$  выражается формулой

$$W(n, R) = C_N^n \left(\frac{V(R)}{V_g}\right)^n \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^{N-n}, \quad (14)$$

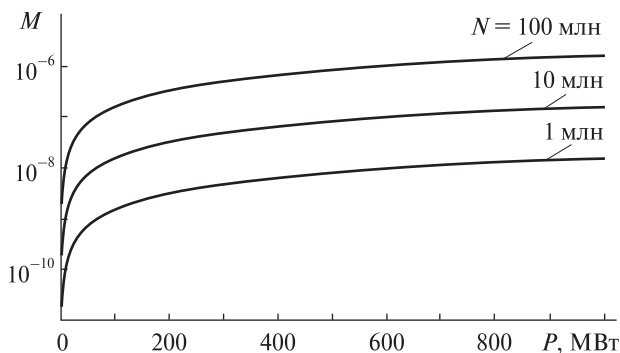
где  $C_N^n$  — биномиальные коэффициенты.

Вероятность обнаружения  $n$  ВЦ по (14) зависит еще от случайной величины объема зоны наблюдения  $V(R)$ . Полная вероятность попадания  $n$  ВЦ в зону обнаружения приемной системы определяется в виде

$$W(n) = \int_0^{R_{\max}} f(R) W(n, R) \quad (15)$$



**Рис. 1.** Зависимость максимальной дальности  $R_{\max}$  обнаружения сигналов от мощности  $P$  передатчика ВЦ при разных значениях коэффициентов усиления  $G$  передающей и приемной антенн (числа у кривых)



**Рис. 2.** Среднее количество  $M$  ВЦ, обнаруживаемых в одном направлении при разных значениях предполагаемого числа  $N$  ВЦ в Галактике (числа у кривых) и мощности  $P$  передатчиков

Соответственно при подстановке (8)–(10) в (15) получим

$$W(n) = W_{\max} W(n, R_{\max}). \quad (16)$$

Определим значение математического ожидания числа ВЦ, попадающих в зону обнаружения приемной системы:

$$M = \sum_{n=0}^N n W(n). \quad (17)$$

Подставив выражения (14), (16) в (17), получим

$$M = W_{\max} \sum_{n=0}^N n C_N^n \left( \frac{V(R_{\max})}{V_g} \right)^n \left( 1 - \frac{V(R_{\max})}{V_g} \right)^{N-n}, \quad (18)$$

и окончательно —

$$M = \frac{4}{3} \pi N \frac{R_{\max}^3}{V_g} \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_t}{4} \right) \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_r}{4} \right). \quad (19)$$

**Результаты расчетов.** Расчет показателей эффективности поиска сигналов ВЦ может быть проведен для любых числовых параметров.

В качестве примера приведем результаты оценки среднего числа ВЦ, которые обнаруживаются в типовой ситуации с параметрами: полоса частот приема/передачи — 1 Гц, длина волны — 21 см, время наблюдения — 480 мин, шумовая температура приемника — 330 К.

Учитывая принципиальное отсутствие достоверной фактической информации о внеземных цивилизациях, все предположения относительно их характеристик, параметров технических средств носят оценочный характер.

Поэтому нижеприведенные расчеты представлены в виде зависимостей интересующих нас величин в диапазоне возможного (или наиболее вероятного) изменения соответствующих параметров ВЦ.

Например, для оценки мощности передатчика ВЦ использован диапазон значений от 1 МВт (уровень, уже реализуемый технологической цивилизацией на Земле) до 1 ГВт (распространенная в технической литературе оценка перспективных параметров передатчиков ВЦ земного типа).

Значения максимальных коэффициентов усиления приемной и передающей антенн могут быть оценены различными способами.

В качестве примера рассмотрен следующий вариант:

- коэффициенты усиления (КУ) приемной и передающей антенн одинаковы;
- КУ антенн подстраиваются в зависимости от направления работы с целью максимизации объема пространственной зоны обнаружения корреспондентов в пределах Галактики (т. е. используется «рациональная стратегия» — применяются антенны с минимальным КУ, обеспечивающим дальность связи до границы Галактики в выбранном направлении);
- КУ антенн не могут превышать некоторого «технологического» предела (в расчетах установленного на уровне 80 дБ).



При таком подходе все расчетные параметры для однократного наблюдения становятся функциями от ориентации антенн. Поэтому в дальнейшем представлены результаты усреднения соответствующих величин по всем направлениям в полном телесном угле.

Зависимость максимальной дальности  $R_{\max}$  обнаружения источника радиосигнала в вышеприведенных предположениях представлена на рис. 1 при разных значениях коэффициентов усиления  $G$  передающей и приемной антенн.

На рис. 2 представлена зависимость среднего числа  $M$  обнаруживаемых ВЦ при разных значениях ключевых исходных данных — предполагаемого числа  $N$  ВЦ в Галактике (оценка Дрейка) и мощности  $P$  передатчиков, применяемых ВЦ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа представленных зависимостей следует вывод, что даже при самых оптимистических предположениях относительно распространенности и энерговооруженности ВЦ вероятность их обнаружения традиционными методами чрезвычайно мала (порядка  $10^{-6}$  ...  $10^{-11}$ ).

Увеличение этой вероятности до сколько-нибудь приемлемого уровня путем последовательного сканирования различных пространственных направлений и различных частот требует, очевидно, адекватного (в  $10^5$ ... $10^{10}$  раз) увеличения времени наблюдения (либо соответствующих материальных затрат при организации параллельных наблюдений).

Это означает на нынешнем организационно-техническом уровне развития практическую невозможность обнаружения сигналов ВЦ при общепринятом подходе, что объясняет существование «парадокса Ферми» и приводит к необходимости разработки новой стратегии поиска.

1. Гиндилис Л. М. Поиск Внеземного Разума. — М.: Физматлит, 2004. — 648 с.

2. Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной. — М.: Мир, 1983. — 488 с.
3. Кардашев Н. С. О стратегии поиска внеземных цивилизаций // Вопр. философии. — 1977. — № 12. — С. 43—54.
4. Проблема поиска жизни во Вселенной // Тр. Таллинского симпозиума. — М., 1986.
5. Тартер Дж. Обзор экспериментальных исследований по поиску сигналов внеземных цивилизаций (в радио и оптическом диапазонах). «Космический стог сена» и современные программы SETI в США // Проблема поиска жизни во Вселенной. — М., 1986. — С. 170—182; 220—225.
6. Филиппова Л. Н. About the radio-observation of the selected SETI-object by RATAN-600, RT-15 and RT-3 as an information for the reflection on the SETI strategy // Тр. Таллинского симпозиума. — М., 1986.
7. Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн. — М.: Радио и связь, 1984. — 272 с.
8. Шкловский И. Разум. Жизнь. Вселенная. — М.: Янус, 1966.
9. Allen Telescope Array Fact Sheet // Пресс-релиз института SETI. — <http://www.seti.org/ata/>.

Надійшла до редакції 30.10.09

I. P. Panfilov, V. I. Panfilov, A. V. Solomko,  
V. G. Mikhailovskii

## THE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE SEARCH FOR RADIO SIGNALS FROM CORRESPONDENTS WITH A MUTUALLY UNKNOWN LOCATION IN SPACE

We give some results of probabilistic estimation of the search for radio signals from correspondents with a mutually unknown location. We derived the formulas for the probability to reveal at least one correspondent with unknown coordinates and to find the average number of such correspondents using a receiving system with preset parameters. It is shown that even the reiteration of observation series with the use of known methods does not allow us to increase the probability of their discovery to some level acceptable from the practical point of view. This means practical impossibility to detect signals from the correspondents of such a type at space distances using universally accepted approach and results in the necessity to elaborate a new search strategy.

УДК 53.06

А. Ф. Ляденко

ТОВ «Інститут високих технологій – Україна», Київ

## ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ АНОМАЛИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ПИОНЕР-10, 11»

*Продемонстровано можливість обчислення аномалії космічних апаратів «Піонер-10, 11». Обчислені за допомогою запропонованої формули та даних про орбітальні параметри КА «Піонер-10, 11» чисельні значення аномалії достатньо близькі до експериментальних значень.*

Целью работы является демонстрация возможности описания обнаруженной у КА «Пионер-10, 11» аномалии [2–7] с помощью простой аналитической зависимости. Напомним, что аномальный эффект (далее – аномалия) состоит в линейном уходе принимаемой на Земле частоты сигнала доплеровской системы измерения скорости КА. Согласно работе [3] аномалия может быть описана в первом порядке по  $v/c$  выражением

$$[v_{obs}(t) - v_{mod}(t)] = -v_0 \frac{a_p t}{c}, \quad (1)$$

где  $v_{obs}$  – частота ретранслированного с КА сигнала, регистрируемого с помощью системы DSN (NASA's Deep Space Network),  $a_p$  – аномальное ускорение КА,  $t$  – текущее время,  $c$  – скорость света,  $v_{mod}$  – расчетная (предсказываемая) частота этого сигнала

$$v_{mod} = v_0 \left[ 1 - \frac{v_{mod}(t)}{c} \right], \quad (2)$$

где  $v_0$  – опорная частота,  $v_{mod}(t)$  – расчетная скорость. В уравнениях (1) и (2), в отличие от [3], удален множитель 2, так как сигнал распространяется в одну сторону.

Как видно, уход частоты можно описать с помощью единственного параметра в выражении (1) – аномального ускорения  $a_p = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>, направленного в сторону Солнца, однако физическая причина, обуславливающая торможение КА, остается невыясненной. В то же время есть и другие подходы к объяснению аномалии, связывающие ее причину не с ускоре-

нием КА, а, например, с космологическим расширением [2].

Предлагаемый подход к получению формулы, позволяющей вычислить численные значения аномалии этих КА, основывается на двух предположениях. Первое состоит в том, что во всех использованных программах расчета параметров орбит используется релятивистская формула, описывающая частоту электромагнитного поля (ЭМП) некоторого движущегося генератора. Второе предположение состоит в том, что вышеупомянутую формулу необходимо рассматривать как приближенную. Используем аксиоматический подход и терминологию [1] для вывода искомой формулы, для чего сформулируем исходные предположения следующим образом.

1. Есть испытываемая теория «Sub», в рамках которой частота  $v_{sub}$  ЭМП, генерируемого движущимся генератором, определяется выражением

$$v_{sub} = v_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{V_{\tau}^2}{c^2}} = v_0 \cdot l, \quad (3)$$

где  $v_0$  – частота, генерируемая при нулевой трансверсальной скорости на том же удалении генератора от центрального небесного тела, что и в случае вычисления  $v_{sub}$  для иных орбит,  $V_{\tau}$  – трансверсальная скорость движения генератора по орбите в поле тяготения центрального небесного тела (определяется по двум параметрам кеплеровой орбиты),  $l$  – безразмерный коэффициент.

2. Известна релятивистская теория «Rel», согласно которой формула частоты  $v_{rel}$  ЭМП, генерируемого движущимся генератором, имеет вид

$$v_{rel} = v \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = v \cdot k, \quad (4)$$

где  $v$  – частота, генерируемая неподвижным генератором,  $k$  – безразмерный коэффициент,  $V$  – полная скорость генератора, которую можно выразить с помощью радиальной и трансверсальной скоростей:

$$V^2 = V_R^2 + V_\tau^2. \quad (5)$$

Очевидно, что в таком случае разность (3) и (4) будет соответствовать разности предсказаний для частоты генератора, выполняемых с помощью проверяемой и релятивистской теорий в случае  $v = v_0$ . Это условие можно считать выполненным, так как инерциально движущийся генератор во время определения  $v_0$  можно считать неподвижным. При  $V \ll c$

$$v_{sub} - v_{rel} = v_0(l - k) = v_0 \cdot m \approx -v_0 \cdot \frac{V_R^2}{2 \cdot c^2}, \quad (6)$$

где  $m$  – безразмерный коэффициент.

Искомая формула получена: численное значение безразмерного коэффициента  $m$  достаточно близко к значению использованного в (1) параметра  $a_p$ . Также с помощью (6) для движущегося генератора можно вычислить предсказываемое разными теориями различие частот. Если рассмотренный выше генератор отождествить с реальным генератором ретранслятора на каждом из КА «Пионер-10, 11», то можно вычислить ожидаемую разность частот для любого участка траектории их движения.

### СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Согласно данным [3] в процессе движения КА «Пионер-10» был обнаружен равномерно изменяющийся во времени уход частоты, описываемый формулой (1), который за 8 лет достиг 1.5 Гц (при пересчете в одну сторону пути). Вычисленное же с помощью (6) изменение частоты на порядок ниже.

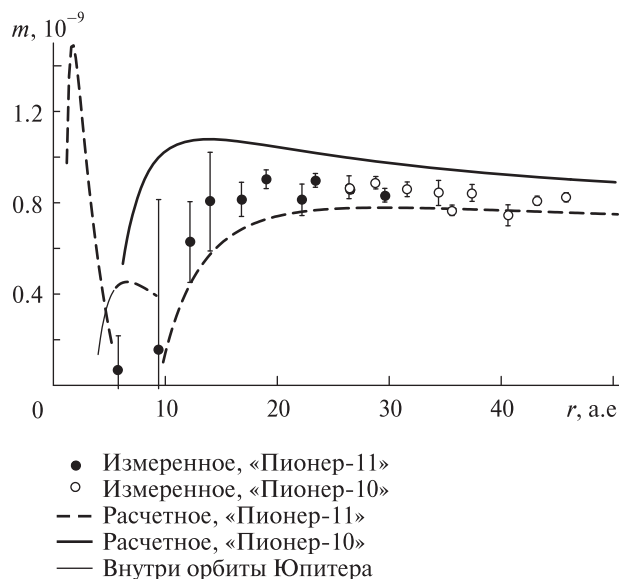
На диапазоне гелиоцентрических расстояний 39–60 а. е. оно изменяется от 2.13 до 1.98 Гц. Расчетная радиальная скорость на этом интервале снижается от 12.9 до 12.5 км/с (частота  $v_0 = 2.29$  ГГц).

С другой стороны, тот факт, что  $a_p \approx m$ , представляется не случайным. Возможно, что из-за

каких-то особенностей весьма сложной процедуры обработки принятого сигнала этот сдвиг частоты около 2 Гц стал проявляться как порожденный нерасчетным ускорением.

Вычислим далее значение  $m$  для различных участков траектории движения рассматриваемых КА.

Неоднократно упоминаемое в литературных источниках значение  $a_p$  – это усредненное значение, в то время как экспериментальные значения  $a_p$  зависят от гелиоцентрического расстояния [5] и лежат в диапазоне  $(0.7-9) \cdot 10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>. Скорее всего, этот факт отражает наличие функциональной зависимости  $a_p$  от положения КА на траектории, а не является разбросом измеренных значений некоторой постоянной величины. Принимая во внимание, что  $V_R = \sqrt{\mu/p} \cdot e \cdot \sin \varphi$ , где  $\mu$  – гравитационный параметр небесного тела,  $p$  – параметр орбиты,  $e$  – эксцентриситет орбиты,  $\varphi = ar \cos \frac{p-r}{r \cdot e}$  – центральный угол,  $r$  – радиус-вектор, мы построили графики аномалии (см. рисунок). При этом величина гравитационного параметра, как и в [5] учитывала массы



Вычисленные значения аномалии КА «Пионер-10, 11» и экспериментальные данные. По оси ординат – безразмерный коэффициент  $m$ , численно совпадающий с величиной аномального ускорения  $a_p$

**Параметры оскулирующих орбит КА «Пионер-10, 11» на различных участках траектории**

Участок траектории	$e$	$p$
«Пионер-10» (Ю→...)	1.734	$2.072 \cdot 10^{12}$
«Пионер-11» (З→Ю)	0.718	$2.557 \cdot 10^{11}$
«Пионер-11» (Ю→С)	0.776	$9.874 \cdot 10^{11}$
«Пионер-11» (С→...)	2.148	$4.403 \cdot 10^{12}$

Солнца, Меркурия, Венеры и системы Земля – Луна. При построении графиков аномалии были использованы данные [5, 7] об орбитальных параметрах КА (см. таблицу). Экспериментальные значения аномалии взяты из работы [5].

Заметим, что график аномалии для КА «Пионер-11» после пролета Юпитера имеет петлеобразный вид: при подлете к нему величина аномалии уменьшилась, затем (при движении внутри орбиты Юпитера) резко увеличилась (на графике этот участок не показан), затем снова уменьшилась, достигая нуля, затем увеличилась по той же самой кривой. Ход кривых на графике для случая вычислений аномалии в сферах действия планет достаточно очевиден и здесь не приводится.

**ВЫВОДЫ**

Численно величина аномалии КА «Пионер-10, 11» на гелиоцентрических расстояниях более 20 а. е. может быть описана с точностью примерно 90 % выражением, представляющим собой отношение половины квадрата радиальной скорости КА к квадрату скорости света. Следовательно, предсказываемое значение аномалии для круговых орбит равно нулю.

Этот факт согласуется с высказываемой в литературе гипотезой, что аномалия КА «Пионер-10, 11» проявляется только на незамкнутых орбитах. Однако из формулы (6) следует, что причина не

в замкнутости или незамкнутости орбиты, а в величине радиальной скорости движения КА. Очевидно, что вычисление радиальной скорости автоматически подразумевается относительно того гравитирующего небесного тела, в сфере действия которого находится рассматриваемый объект. Имеет ли место  $m \approx a_p$  в более широком диапазоне гелиоцентрических расстояний, возможно, удастся проверить, так как есть надежда, что будет выполнена обработка старых доплеровских данных КА «Пионер-10, 11» [4].

1. Бунге М. Философия физики. – М.: Прогресс, 1975. – 352 с.
2. Томильчик Л. М. Аномальный фиолетовый дрейф частоты излучения как локальное проявление космологического расширения // Оптика и спектроскопия. – 2007. – **103**, № 2. – С. 246–250.
3. Anderson J. D., Laing P. A., Lau E. L., et al. Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11 // Phys. Rev. D. – 2002. – **65**. – 082004/1-50, arXiv:gr-qc/0104064v5.
4. Lämmerzahl C., Preuss O., Dittus H. Is the physics within the Solar system really understood? // General Relativity and Quantum Cosmology. – arXiv:gr-qc/0604052v1.
5. Nieto M. M., Anderson J. D. Using early data to illuminate the Pioneer anomaly // Class. Quant. Grav. – 2005. – **22**. – P. 5343–5354. – arXiv:gr-qc/0507052v2.
6. Toth V. T. Study of the Pioneer Anomaly: A scientific detective story // Postgrad. Mag. – 2007. – **1**. – P. 24–30. – arXiv:0903.0075v1.
7. Turyshev S. G., Nieto M. M., Anderson J. D. Study of the Pioneer Anomaly: A Problem Set // Amer. J. Phys. – 2005. – **73**. – P. 1033–1044. – arXiv:physics/0502123v5.

Надійшла до редакції 04.06.09

A. F. Liadenko

**THE CALCULATED VALUES FOR ANOMALY OF THE «PIONEER-10, 11» SPACECRAFTS**

The possibility to evaluate the anomaly of the «Pioneer-10, 11» spacecrafts is shown. Calculated with the help of the formula proposed and data on orbital parameters of the «Pioneer-10, 11» spacecrafts, the numerical values of anomaly are close enough to experimental values.

### К 60-летию со дня рождения доктора физико-математических наук профессора Леонида Феокистовича ЧЕРНОГОРА



Леонид Феокистович Черногор — признанный в Украине и за рубежом радиофизик, космофизик, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии УССР в области науки и техники (1989 г.), а также двух премий Совета Министров СССР и премии МВССО СССР.

Л. Ф. Черногор родился 2 июня 1950 г. на Харьковщине. В 1972 г. он с отличием закончил

радиофизический факультет Харьковского государственного университета, в 1975 г. защитил кандидатскую, а в 1987 г. — докторскую диссертации. Избран академиком АН Прикладной радиоэлектроники Беларуси, России и Украины (1993 г.), академиком АН Высшей школы Украины (2005 г.).

До 1991 г. Л. Ф. Черногор занимался разработкой физических основ новых радиосистем контроля космического пространства, ракетно-космической обороны и обнаружения ядерных взрывов.

В настоящее время его научные интересы связаны с проблемами космической радиофизики, дистанционного радиозондирования атмосферы и геокосмоса, физикой высокоэнергичных явлений в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ), активными экспериментами в этой системе. Им сформулирована и развита концепция о том, что образование ЗАИМ — открытая динамическая нелинейная система, исследованы механизмы взаимодействия подсистем, определены пороги возбуждения и изучены проявления спусковых механизмов в подсистемах.

Еще в 1980-х гг. им экспериментально установлено и теоретически объяснено составляющее предмет открытия неизвестное ранее явление возникновения крупномасштабных (более 1000 км) возмущений в околоземной плазме и геомагнитном поле, вызванных воздействием на



ионосферу мощного нестационарного радиоизлучения.

Опубликовано более 600 научных трудов, представлено на отечественные и международные конференции более 500 докладов и сообщений.

Автор 17 книг, в том числе учебных пособий «Нелинейная радиофизика», «Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса», монографий «О нелинейности в природе и науке», «Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет», «Сверхширокополосные сигналы и процессы» и др.

Основные научные направления Л. Ф. Черногора следующие.

1. Получили развитие теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия мощного нестационарного радиоизлучения различных диапазонов с околоземной и космической средами. Построены основы нестационарной теории и осуществлена ее экспериментальная проверка. На этой основе разработана и реализована комплексная диагностика параметров геокосмической плазмы.

Разработаны приложения мощных пучков радиоволн.

2. Предложены новые и развиты существующие методы контроля космического пространства и диагностики околоземной и космической сред на основе дистанционного радиозондирования атмосферы и геокосмоса.

Исследованы крупномасштабные и глобальные физические процессы в атмосфере и геокосмосе, сопровождавшие старты, полеты ракет и космических аппаратов, мощные химические и ядерные взрывы, падения крупных космических тел естественного и искусственного происхождения и т. п.

Построены основы эмпирических и теоретических моделей соответствующих явлений и процессов.

3. Получили развитие теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных (СШП) процессов и сигналов. Показано, что большинство физических процессов в геокосмосе относятся к сверхширокополосным.

Предложены новые классы фрактальных и нелинейных СШП-сигналов.

Установлена связь между сверхширокополосными сигналами и вейвлетами.

Предложен системный спектральный анализ процессов и сигналов на основе ряда линейных и нелинейных интегральных преобразований для случая гауссовских и негауссовских помех.

Основное уравнение дистанционного радиозондирования (основное уравнение радиолокации) обобщено на случай применения СШП-сигналов.

4. Обоснована целесообразность использования геостационарных стратостатов для решения телекоммуникационных проблем и задач дистанционного радиозондирования, а также мониторинга поверхности Земли и воздушно-космического пространства.

Определены основные массо-габаритные, кинематические, динамические, энергетические, радиофизические и информационные показатели соответствующих систем телекоммуникаций, дистанционного радиозондирования и мониторинга сред.

5. Разработан и реализован комплексный подход к анализу радиофизических и геофизических эффектов, а также геоэкологических последствий современных военных действий, катастроф на военных объектах и высокоэнергоемких производствах. Заложены основы соответствующего нового научного направления в геофизической и космофизической экологии.

6. Сформулированы основы нелинейной парадигмы. Обосновано, что нелинейность — универсальное фундаментальное и главное свойство мира.

**БЕЛЯЄВ Сергій Михайлович** — заступник завідувача відділу електромагнітних досліджень Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — електромагнітні дослідження.

**БОДНАР Ласло** — директор підприємства «BL-Electronics Kft.» (Шольмар, Угорщина), доктор.

**ВОЛКОВ Сергій Костянтинович** — інженер Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

Напрямок науки — конструювання оптичних приладів для спостережень супутників.

**ГРИГОРЕНКО Володимир Володимирович** — інженер першої категорії Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі та обробка даних ДЗЗ.

**ДУГІН Станіслав Сергійович** — провідний інженер Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі та обробка даних наземної спектрометрії.

**ЖИВОЛУП Тарас Григорович** — науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геофізика, іоносферні збурення, іонний склад іоносфери.

**ЖОЛОБАК Галина Михайлівна** — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, доцент.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

**ЗЕЛЕНИЙ Лев Матвійович** — директор Інституту космічних досліджень Російської академії наук, академік РАН, закордонний член НАН України.

Напрямок науки — космічні дослідження.

**КАРПЕНКО Геннадій Федорович** — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

Напрямок науки — програмування.

**КАРТАШОВ Віктор Митрофанович** — старший науковий співробітник НДЧ кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — прикладна ядерна фізика, проходження іонізаційних випромінювань крізь речовину, фізика космічних променів.

**КИЗИМ Павло Семенович** — старший науковий співробітник НДЧ кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрямок науки — експериментальна ядерна фізика, техніка ядерно-фізичного експерименту.

**КЛІМОВ Станіслав Іванович** — завідувач лабораторії дослідження електромагнітних емісій Інституту космічних досліджень Російської академії наук, доктор технічних наук.

Напрямок науки — дослідження електромагнітних емісій.

**КОВТУН Володимир Євгенович** — старший науковий співробітник НДЧ кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрямок науки — прикладна ядерна фізика, техніка ядерно-фізичного експерименту.

**КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович** — заступник директора, завідувач відділу електромагнітних досліджень Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — апаратура та методика дослідження електромагнітних полів і струмів у космічній плазмі.

**ЛІХТЕНБЕРГЕР Янош** — науковий співробітник групи космічних досліджень факультету геофізики Університету ім. Етвеша, доктор.

Напрямок науки — космічні дослідження.

**ЛЯДЕНКО Андрій Пилипович** — науковий співробітник ТОВ «Інститут високих технологій — Україна».

Напрямок науки — загальні питання космонавтики.

**ЛЯЛЬКО Вадим Іванович** — директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрямок науки — географія, дистанційні дослідження природних ресурсів.

**МАРУСЕНКОВ Андрій Анатолійович** — старший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — космічні дослідження.

**МИХАЙЛОВСЬКИЙ Валентин Григорович** — директор з адміністративних питань «МТС-Україна».

**НОВІКОВ Денис** — старший інженер лабораторії дослідження електромагнітних емісій Інституту космічних досліджень Російської академії наук.

Напрямок науки — дослідження електромагнітних емісій.

**ПАНФІЛОВ Іван Павлович** — завідувач кафедри основ схемотехніки Одеської національної академії зв'язку ім. А. С. Попова, доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — теорія інформації.

**ПАНФІЛОВ Віктор Іванович** — директор Південного територіального управління «МТС-Україна», кандидат технічних наук.

Напрямок науки — теорія передавання сигналів.

**ПІШКАЛО Микола Іванович** — старший науковий співробітник відділу сонячної активності і сонячно-земних зв'язків Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика Сонця (сонячна хромосфера, сонячна корона, сонячна активність).

**САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч** — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геолого-мінералогічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну, обробка даних космічної зйомки.

**СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна** — молодший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних до-

сліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — математичне моделювання та методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

**СОЛОМКО Олександр Віталійович** — начальник Одеського філіалу Українського державного центру радіочастот, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — теорія поширення радіохвиль, електромагнітна сумісність, антенно-фідерні установки.

**СТЕРВОЄДОВ Сергій Миколайович** — старший викладач кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрямок науки — інформаційні системи, електроніка, ядерна електроніка, фізичні технології.

**СУХОВ Петро Петрович** — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечнікова.

Напрямок науки — фотометрія геостационарних супутників.

**ФЕРЕНЦ Чаба** — керівник групи космічних досліджень факультету геофізики Університету ім. Етвеша, доктор.

Напрямок науки — космічні дослідження.

**ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович** — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, лауреат Премії МВССО СРСР, лауреат Премій Ради Міністрів СРСР.

Напрямок науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погода.

**ШМАТКО Євген Степанович** — доцент кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук. Лауреат Державної премії України. Відмінник освіти України.

Напрямок науки — прикладна ядерна фізика, проходження іонізаційних випромінювань крізь речовину, фізика космічних променів.

**ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна** — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, методи обробки даних дистанційного зондування Землі.