

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

київ

Том 13, № 3, 2007

KYIV

ЗМІСТ

Шувалов В. А., Тихий В. Г., Потапович Л. П., Приймак А. І., Письменний Н. І., Кочубей Г. С. Молекулярное загрязнение поверхностей КА при термостатировании и выведении космической головной части ракеты-носителя на орбиту

Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Методы контроля эксплуатационных характеристик теплозащиты волоконно-оптическими датчиками

Доценко О. В., Дмитренко В. Я., Тарасов В. Б., Шовкопляс Ю. А. Метод расчета интенсивности одиночных событий с учетом реальной защищенности интегральных схем в местах их размещения внутри космического аппарата

CONTENTS

- 3 Shuvalov V. A., Tykhyy V. G., Potapovich L. P., Priymak A. I., Pismenniy N. I., Kochubey G. S. Molecular contamination of spacecraft surfaces in thermostatic control and orbital injection of launch vehicle nose cone
- 12 Gornostaev G. F., Pasichny V. V., Tkachenko G. V. Methods for control of operational characteristics of thermal insulation devices by fiber-optical sensors
- 19 Dotsenko O. V., Dmitrenko V. Ya., Tarasov V. B., Shovkoplyas Yu. A. Single event effect calculation method taking into consideration real protection of integral circuits inside a satellite

Авдєєв В. В. Маневр обходу небезпечної зони супутником з рушійною установкою малої тяги радіального напрямку

Загорулько А. Н., Моргун О. А., Богом'я В. І. Аналіз можливості використання ефекту розсіювання для визначення космічного сміття

Яценко В. А., Коцубей С. М., Хандрига П. А., Донець В. В., Семенив О. В. Новий метод дистанціонного оцінювання содережання хлорофилла в растительності іого программно-аппаратная реализация

Попов М. А., Марков С. Ю., Станкевич С. А., Бодня А. Л. Система каталогизации и распределенного доступа к данным дистанционного зондирования Земли: концепция, архитектура, реализация

Івченко В. М., Корепанов В. Є., Лізунов Г. В., Федоров О. П., Ямпольський Ю. М. Іоносферний супутниковий проект «Іоносатс»

Стоділка М. І. О природе п'ятимінутних колебань якості Сонця

НАШІ АВТОРИ

27 *Avdeev V. V.* Manoeuvre to bypass a dangerous zone by a satellite with thruster of low tractive force and radial direction

31 *Zagorulko A., Morgun A., Bogomia V.* Analysis of possibility of the use of the dispersion effect for determination of space debris

35 *Yatsenko V. O., Khandriga P. O., Kochubey S. M., Donets V. V.* New method for remote sensing estimation of chlorophyll contents in vegetation and its software realization

45 *Popov M. A., Markov S. Yu., Stankevich S. A., Bodnia A. L.* The system of cataloguing and distributed access to remote sensing data: conception, architecture, realization

55 *Ivchenko V. M., Korepanov V. Ye., Lizunov G. V., Fedorov O. P., Yampolsky Yu. M.* The ionospheric satellite cluster Ionosats

67 *Stodilka M. I.* On the nature of solar irradiance five-minute oscillations

82 OUR AUTHORS

УДК 533.27

В. А. Шувалов¹, В. Г. Тихий², Л. П. Потапович²,
А. И. Приймак¹, Н. И. Письменный¹, Г. С. Кочубей¹

¹Інститут технічної механіки Національної академії наук і Національного космічного агентства України, Дніпропетровськ

²Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Молекулярное загрязнение поверхностей КА при терmostатировании и выведении космической головной части ракеты-носителя на орбиту

Надійшла до редакції 14.04.06

Розроблено розрахунково-експериментальні процедури для інженерних оцінок рівнів чистоти поверхонь і маси молекулярного забруднення КА при термостатуванні космічної головної частини ракети-носія «Дніпро» повітрям високого тиску і на етапі виведення космічної головної частини на орбіту. Показано, що при термостатуванні космічної головної частини повітрям чистоти класу 5000 молекулярне забруднення поверхонь КА відповідає рівням $A/65 \leq \xi \leq A/25$, а на етапі виведення на орбіту маса часток конденсованої фази летких сполук на поверхнях КА за 930 с польоту лежить у межах $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq 2.690 \text{ мг/м}^2$, що не пірше від рівня чистоти $\xi \leq A/3.6$ за стандартом MIL STD 1246 C.

ВВЕДЕНИЕ

Задача контроля и обеспечения заданного уровня чистоты поверхностей КА актуальна не только для условий эксплуатации на орбите, но и для этапов предстартовой подготовки и выведения космической головной части (КГЧ) ракеты-носителя на орбиту. Задача по сути является составной частью проблемы обеспечения длительной эксплуатации КА.

Есть прямая связь между уровнем молекулярного загрязнения и точностью реализации научно-технических программ, измерений, сроком и качеством функционирования бортовой аппаратуры и систем КА [14]. Молекулярное загрязнение поверхностей КА формируется на этапе наземной подготовки, при выведении и эксплуа-

тации КА на орбите. Загрязнение поверхностей КА на этапах предварительной подготовки, термостатирования и выведения КГЧ на орбиту может существенно изменить термооптические характеристики материалов, элементов конструкций бортовых систем. Следствием этого является ухудшение рабочих характеристик систем терморегулирования, солнечных отражателей и теплового баланса в целом. Загрязнение на поверхности солнечных батарей (СБ) — одна из причин уменьшения электрической мощности СБ; слои молекулярного загрязнения на поверхностях оптических систем вносят погрешности, существенно ослабляют сигналы датчиков — уменьшают сроки активной эксплуатации КА на орбите [12]. Эффективный контроль загрязнения, прогнозирование и обеспечение требуемого

уровня чистоты поверхностей элементов конструкций и бортовых систем является одним из элементов, предопределяющих ресурс, сроки активной эксплуатации КА на орбите.

Практически нет стандартизованных методик и процедур оценивания уровней молекулярного загрязнения поверхностей КА. Расчетно-экспериментальные оценки, как правило, основаны на интуиции исследователя.

Цель работы — разработать расчетно-экспериментальные процедуры оценки загрязняющего воздействия космической головной части ракеты-носителя «Днепр» на КА при термостатировании и выведения КГЧ на орбиту, дать инженерные оценки уровней чистоты поверхностей КА на основе стандартов MIL STD 1246 C, ECSS-Q-70-01A [13, 14].

СТРУКТУРА КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ДНЕПР»

Основными источниками загрязнения поверхностей КА, установленного в КГЧ ракеты-носителя (РН) «Днепр», являются:

- воздух системы термостатирования высокого давления (подается во внутренний объем КГЧ). Вместе с воздухом могут подаваться твердые частицы и масло в виде аэрозолей и паров;
- лакокрасочные покрытия и kleящиеся пленки на внутренних поверхностях головного обтекателя (ГО).

Схема размещения КА и структура КГЧ ракеты-носителя «Днепр» показана на рис. 1.

Для термостатирования КГЧ используется воздух класса чистоты ISO 6.7 по ISO 14644-1 ($N_c \approx 5000$ по FED-STD-209E [13]). Воздух из системы термостатирования подается в ГО распылением через 16 форсунок. Поверхности 5, 6 и 7 КА «омываются» воздухом сверху вниз. Выход термостатирующего воздуха — в нижней части ГО.

Внутренняя поверхность оболочки ГО (диаметр $D = 3000$ мм, $h_1 = 5250$ мм) покрыта эмалью ЭП-525, нанесенной при изготовлении РН около 20 лет назад. Эмаль ЭП-525 — суспензия пигментов Cr_2O_3 в растворе эпоксидной смолы Э-41 и смеси органических растворителей: 50 %-го раствора гексаметиледиамина в

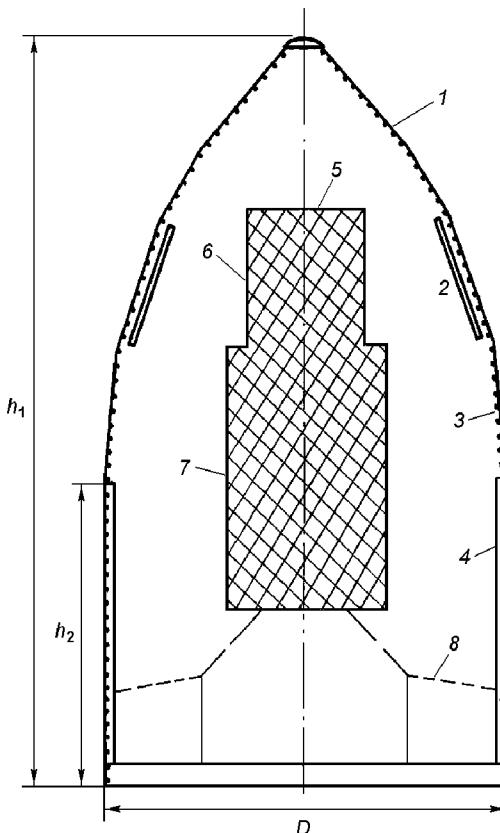


Рис. 1. Структура КГЧ ракеты-носителя «Днепр»: 1 — ГО, 2 — система термостатирования воздухом высокого давления, 3 — эмаль ЭП-525, 4 — «сэндвич», 5, 6, 7 — поверхности КА, 8 — дренажное устройство

этанолом спирте и смеси из ацетона (30 %), ксиола (40 %), бутилацетата (30 %) в этиловом спирте.

В нижней части КГЧ (высота $h_2 = 1380$ мм) на краску нанесена липкая лента марки НИИКАМ-ПМ-ОА-Л, изготовленная на основе металлизированной полимицной пленки — «сэндвич».

Стравливание воздуха в атмосферу, вакуумирование объема КГЧ в полете осуществляется через дренажные отверстия и дренажное устройство, выполненное из фильтрующего материала марки ФПП-15-1.5(0.6) — слой ультратонких волокон диаметром 1.5 мкм, нанесенных на марлевую подложку из клеенного полотна (общая площадь около 1.5 m^2).

МОЛЕКУЛЯРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КА ПРИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ

Для термостатирования КГЧ используется воздух класса чистоты $N_c = 5000$ согласно классификации международного стандарта ISO14644-1 и Федерального стандарта США FED STD 209E. Предельное содержание частиц в 1 м³ воздуха может быть определено по формуле [14]

$$N_{np} = 35.31 N_c (0.5 \text{ мкм}/r)^{2.2}, \quad (1)$$

где N_c — класс чистоты воздуха, r — размер частиц в мкм.

В работе [14] установлено, что число частиц размером не менее r , осевших на 0.1 м² площади за время t (сут) при нормальном падении, равно $N = cp\tilde{N}_c^\beta t$, где $\tilde{N}_c = N_c(0.5 \text{ мкм}/r)^{2.2}$, $c = 1.076$, p — функция скорости потока воздуха, β — показатель степени.

Для оценки уровня чистоты поверхности X_1 (согласно классификации MIL STD 1246C) как функции числа частиц, осевших на горизонтальную плоскость $\theta = 0^\circ$ (θ — угол между внутренней нормалью к элементу поверхности n и вектором скорости потока термостатирующего воздуха U_∞), и времени t может быть использовано соотношение [14]

$$\lg N(r) = 0.926 \lg(rX_1) \lg(X_1/r) + \lg(\lg X_1 / \lg r). \quad (2)$$

При скорости потока воздуха $U_\infty \geq 0.45$ м/с принято $p = 578$. Для РН «Днепр» $U_\infty \geq 3.5$ м/с, для РН «Зенит» — от 1.5 до 2.0 м/с. Для частиц размером $R \geq 5$ мкм в работе [14] получена эмпирическая оценка $\beta = 0.773$. С другой стороны, согласно [13] число частиц, осевших на единицу площади за $t = 1$ сут для $N_c = 100...10000$ пропорционально $0.069N_c^{0.72}$ ($\beta = 0.72$).

Расчет значений X_1 ($r = 1$, $p = 578$) показал, что при неопределенности выбора β между 0.72 и 0.773 погрешность величины X_1 не превышает 5 %.

Влияние угла атаки θ иллюстрирует рис. 2. Значение $\theta = 0$ соответствует горизонтальной плоскости, $\theta = 90^\circ$ характеризует обтекание вертикальной, а $\theta = 180^\circ$ — подветренной поверхности. Представленная на рис. 2 зависимость

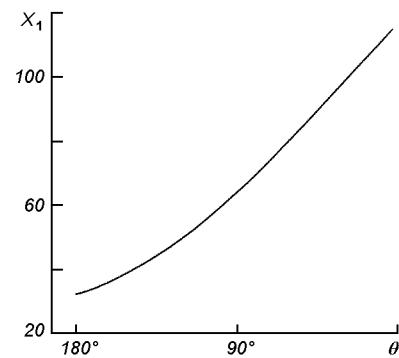


Рис. 2. Зависимость уровня чистоты X_1 элемента обтекаемой поверхности КА от угла атаки θ в потоке термостатирующего воздуха класса чистоты $N_c = 5000$

$X_1(\theta)$ свидетельствует, что наихудший уровень чистоты поверхности КА при термостатировании КГЧ РН «Днепр» потоком воздуха класса чистоты $N_c = 5000$ равен $X_1 \approx 120$.

В соответствии с MIL STD 1246C число частиц, осевших на единицу площади поверхности (0.1 м²) за сутки, может быть определено из соотношения (2) при $t = 1$ сут, толщина слоя загрязнения, сформированного частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$ — по формуле

$$l_\Sigma = \int_0^\infty n(r) \frac{\pi r^3}{6} dr \approx \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{k-1} \pi \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^3 \int_{r_i}^{r_{i+1}} n(r) dr = \\ = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{k-1} \pi \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^3 N(r_i \leq r \leq r_{i+1}) = \sum_{i=0}^{k-1} l_i, \quad (3)$$

а фактор загрязнения OF (мм²/м²) — площадь единицы поверхности, покрытой частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$, — из соотношения

$$OF = \int_0^\infty n(r) \frac{\pi r^2}{4} dr = \\ = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\pi (r_i + r_{i+1})^2}{4} N(r_i \leq r \leq r_{i+1}) = \sum_{i=0}^{k-1} S_i, \quad (4)$$

где $n(r)$, м⁻³ — плотность вероятности того, что частица имеет размер r , $N(r_1 \leq r \leq r_2)$, м⁻² — число частиц с размерами между r_1 и r_2 на единице поверхности, l_i , нм — толщина слоя

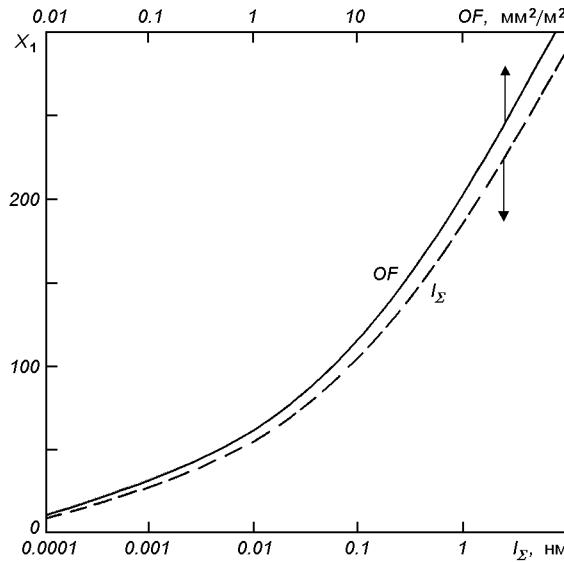


Рис. 3. Расчетные зависимости фактора загрязнения поверхности космического аппарата OF и толщины слоя загрязнения l_Σ от уровня чистоты X_1

загрязнения, сформированного частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$, l_Σ , нм — толщина слоя загрязнения, сформированного частицами всех размеров (k сортов), S_i , $\text{мм}^2/\text{м}^2$ — площадь покрытия частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$.

Масса загрязнения M_Σ , $\text{кг}/\text{м}^2$ на обтекаемой поверхности определится по формуле

$$M_\Sigma = \rho l_\Sigma, \quad (5)$$

где ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ — плотность осевшего вещества.

Расчетные зависимости $OF(X_1)$ и $l_\Sigma(X_1)$ для $r_i = 0.001 \dots 1000$ мкм представлены на рис. 3. Значения $M_\Sigma(X_1)$ при $\rho = 0.9 \text{ г}/\text{см}^3$ (масло), а также уровни молекулярного загрязнения A по MIL STD 1246C [14] приведены на рис. 4. Уровню чистоты поверхности $X_1 \approx 120$ ($t = 1$ сут, $\theta = 0$, масло) соответствует уровень молекулярного загрязнения по MIL STD 1246C — $A/65$: $M_\Sigma \approx 0.16 \text{ мг}/\text{м}^2$, $l_\Sigma \approx 0.18 \text{ нм}$, $OF \approx 11.7 \text{ мм}^2/\text{м}^2$.

С другой стороны по формуле [13] упрощенные оценки для воздуха класса чистоты $N_c = 5000$ дают значение $OF \approx 0.069N_c^{0.72} \approx 31.8 \text{ мм}^2/\text{м}^2$, что соответствует уровню чистоты поверхности $X_1 \approx 150$ и толщине слоя

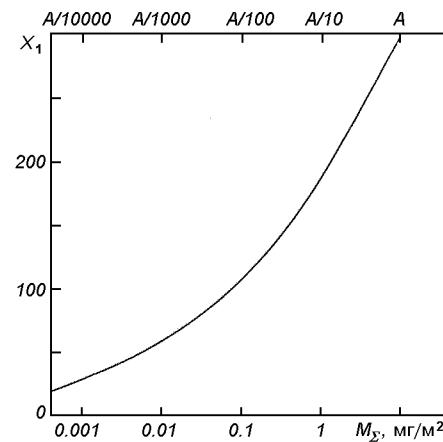


Рис. 4. Зависимость массы слоя загрязнения M_Σ и уровня молекулярного загрязнения A (по MILSTD1246C) от уровня чистоты поверхности X_1

загрязнения $l_\Sigma \approx 0.43 \text{ нм}$, массе слоя загрязнения $M_\Sigma \approx 0.4 \text{ мг}/\text{м}^2$ (масло) и уровню $A/25$ молекулярного загрязнения MIL STD 1246C [14] (рис. 3 и 4).

Таким образом, применение процедур, основанных на MIL STD 1246C [13, 14], дает предельные значения для уровня чистоты поверхности $120 \leq X_1 \leq 150$; толщины слоя загрязнения $0.18 \leq l_\Sigma \leq 0.43 \text{ нм}$, массы загрязнения (масло) $0.16 \leq M_\Sigma \leq 0.4 \text{ мг}/\text{м}^2$, что соответствует уровню молекулярного загрязнения поверхности КА $A/65 \leq \xi \leq A/25$ при термостатировании КГЧ воздухом класса чистоты $N_c = 5000$.

Измерения на орбите свидетельствуют, что слой загрязнения $l_\Sigma \leq 1.5 \text{ нм}$ вызывает пренебрежимо малые изменения коэффициентов пропускания и отражения в диапазоне длин волн λ_γ от 0.28 до 2.0 мкм [6].

Наличие тонких пленок молекулярного загрязнения $l_\Sigma \approx 10 \text{ нм}$ (уровень A) дает пренебрежимо малый эффект для поверхностей теплового контроля и солнечных батарей КА [12, 14]. Оптические поверхности более восприимчивы к загрязнению. Молекулярное загрязнение осаждается не в виде отдельного слоя, а в виде отдельных молекул, кластеров, молекулярных образований. Это характерно по крайней мере

для первых 100 монослоев ($l_{\Sigma} < 10$ нм). Если молекулы, кластеры непрозрачны в оптическом диапазоне длин волн (например масло), то преобладающим эффектом для потери потока энергии электромагнитного излучения является рассеяние, особенно для видимого и УФ-диапазонов ($\lambda_{\nu} = 0.2 \dots 0.7$ мкм, где λ_{ν} — длина волны электромагнитного излучения).

Для рассеяния на частицах характерны три области [7].

1. Коротковолновая, когда размер частицы r много больше длины волны электромагнитного излучения (приближение геометрической оптики, $r/\lambda_{\nu} \gg 1.0$). В этом случае

$$\frac{\Pi_r}{\Pi_i} \sim \frac{\sigma}{\sigma_m} \approx 1.0,$$

где Π_r — плотность потока рассеянной энергии электромагнитного излучения, Π_i — плотность потока падающей энергии, σ — эффективный поперечник рассеяния электромагнитного излучения частицей (ЭПР), $\sigma_m = \pi r^2 / 4$ — геометрооптическое приближение ЭПР частицы (сфера).

2. Резонансная область рассеяния, когда размер частицы сравним с длиной волны ($r/\lambda_{\nu} \approx 1$). Для сферы

$$\Pi_r/\Pi_i \sim \sigma/\sigma_m \approx U(r/\lambda_{\nu}),$$

где $U(r/\lambda_{\nu})$ — осциллирующая функция, принимающая значения от 10^{-4} до 3.6, когда $0.1 \leq r/\lambda_{\nu} < 4$ [7, 14].

3. Длинноволновая область (рэлеевское рассеяние), когда $r/\lambda_{\nu} \ll 1.0$

$$\Pi_r/\Pi_i \sim \sigma/\sigma_m \approx 9(\pi r/\lambda_{\nu})^4.$$

Для частиц с характерным размером r от 0.1 до 1000 мкм в видимой и УФ-части спектра реализуется коротковолновое рассеяние (приближение геометрической оптики). Для частиц размером от 0.001 до 0.01 мкм в оптическом диапазоне длин волн — рэлеевское (длинноволновое) рассеяние.

Фильтр тонкой очистки системы термостатирования воздухом высокого давления с эффективностью 99.9999 % экранирует термостатируемый объем КГЧ РН «Днепр» от частиц размером $r \geq 0.01$ мкм. Молекулярное загрязнение формируют частицы размером от 0.001 до

0.01 мкм. Для этих частиц при $t = 1$ сут из выражений (4) и (5) следует $l_{\Sigma} \leq 6.4 \cdot 10^{-6}$ нм и $M_{\Sigma} \leq 5.8 \cdot 10^{-6}$ мг/м² (масло). Максимальные потери потока энергии электромагнитного излучения видимого и УФ-спектров ($0.2 \leq \lambda_{\nu} \leq 1.0$ мкм) меньше чем 0.0055, т. е. молекулярным загрязнением такого уровня на оптических поверхностях КА можно пренебречь.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КА ПРИ ВЫВЕДЕНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НА ОРБИТУ

В полете при выведении КГЧ на орбиту оболочка ГО нагревается до температуры около 130°. Расчетная циклограмма изменения температуры оболочки ГО за 930 с полета представлена на рис. 5 (кривая 1). Динамику процессов в объеме КГЧ характеризуют два явления: газовыделение летучих компонентов при термической деструкции лакокрасочных и органических материалов и покрытий внутренних поверхностей КГЧ и вакуумирование объема через дренажную систему и негерметичности отсеков ГО. Процедура физического моделирования динамики процесса газовыделения в объеме КГЧ включает несколько этапов — моделирование динамики изменения давления, исследование процессов потери массы органическими материалами КГЧ вследствие их термической деструкции и конденсация летучих фракций на холодных поверхностях КА.

Условиями физического моделирования процессов газовыделения в объеме КГЧ и термической деструкции органических материалов являются следующие.

1. $P_0^{(H)} \approx P_0^{(M)}$ — равенство давлений в объеме в момент начала процесса термической деструкции органических материалов.

2. $T_W^{(H)}(t_H) \approx T_W^{(M)}(t_M)$ — равенство температур оболочки ГО (Al) в полете и металлической подложки образца (Al) в модельном эксперименте.

3. $V_p^{(M)}/V_{0\Sigma}^{(M)} \approx V_{\text{ГЧ}}^{(H)}/V_{0\infty}^{(H)}$ — равенство отношений рабочего объема $V_p^{(M)}$ к объему ресивера $V_{0\Sigma}^{(M)}$ (бустерная емкость) в модельном эксперименте (индекс «M») и объема КГЧ — $V_{\text{ГЧ}}^{(H)}$ к объему пространства $V_{0\infty}^{(H)}$, прилегающего к КГЧ

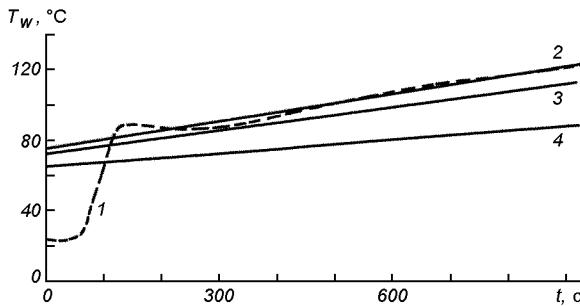


Рис. 5. Температурные циклограммы материалов КГЧ за 930 с: 1 — ГО, 2 — подложка (Al), 3 — эмаль ЭП-525, 4 — липкая лента НИИКАМП-ПМ-ОА-Л (образец «сэндвич»)

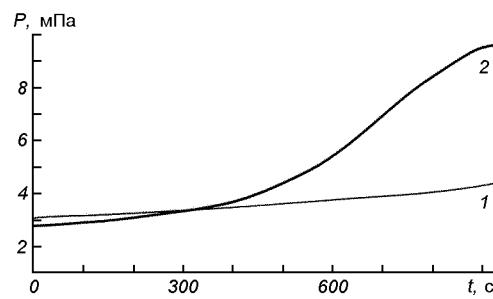


Рис. 6. Изменение парциального давления летучих компонентов продуктов термодеструкции органических материалов в условиях модельного эксперимента: 1 — эмаль ЭП-525, 2 — «сэндвич»

в условиях полета (индекс «Н»).

4. $g_M(t_M) \approx g_H(t_H)$ — равенство удельных потоков газовой фазы, испаряющейся в единицу времени с единицы поверхности при термодеструкции органических материалов.

Экспериментальные исследования проводились на плазмогазодинамическом стенде ИТМ. Образцы испытываемых материалов размером $65 \times 65 \text{ мм}$ — эмаль ЭП-525 на алюминиевой подложке и «сэндвич» закрепляли на поверхности термостата с омическим подогревом, помещенного в вакуумированный отсек объемом $V_p^{(M)} \approx 0.0144 \text{ мм}^3$. Отсек посредством вакуумпроводка соединен с ресивером (бустерная емкость) объемом $V_{0\Sigma}^{(M)} \approx 7.5 \text{ м}^3$. В ресивере с помощью высокопроизводительной безмасляной системы откачки поддерживалось постоянное давление на уровне 100 мкПа.

Испытываемые образцы дренированы миниатюрными термопарами хромель-копель диаметром около 0.1 мм.

На рис. 5 представлены циклограммы изменения температур компонентов образцов за 930 с. Кривая 2 — циклограмма $T_W^{(M)}(t_M)$ алюминиевой подложки образца, 3 — эмаль ЭП-525, 4 — пленка НИИКАМП-ПМ-ОА-Л (образец «сэндвич»). Приведенные циклограммы изменения температуры образцов свидетельствуют, что условие 2 выполняется при $t \geq 200 \text{ с}$ ($t_H = t_M$). Условие 3 выполняется, если принять, что линейные размеры пространства, прилегающего к КГЧ $V_{\Gamma\text{Ч}}^{(H)} \approx 20.28 \text{ м}^3$, на порядок превосходят линейные размеры ГО. По оценкам изменения

давления воздуха в объеме КГЧ в полете и результатам измерения парциальных давлений в модельном эксперименте (рис. 6) началу процесса газовыделения (вследствие термодеструкции органических материалов) соответствует $P_0^{(H)} \approx P_0^{(M)} \sim 3 \text{ мПа}$ ($t_{0M} \approx 200 \text{ с}$).

Из условия равенства удельных потоков массы материала, испаряющегося за время Δt в модельном эксперименте и в полете, следует

$$Q_H = Q_M \frac{A_H \cdot \Delta t_H}{A_M \cdot \Delta t_M}.$$

Здесь Q_j — поток продуктов газовыделения испаряющегося материала ($j = H, M$), A_H, A_M — площади покрытия поверхности КГЧ и образца соответственно. С учетом условия для проводимости вакуумпроводка [10]: $U_H = Q_H / \Delta P_H$ или $U_H = Q_H / P_H$ ($P_H \gg P_{0\Sigma}$, $P_{0\Sigma}$ — давление в бустерной емкости или окружающем КГЧ пространстве) следует

$$P_H = \frac{Q_H}{U_H} \approx P_M \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_H}{A_M} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M}.$$

Для давления в объеме КГЧ с учетом неоднородности покрытия внутренних поверхностей ГО получим

$$P_\Sigma^{(H)} \approx \left(P_{kp}^{(M)} \cdot \frac{A_{kp}^{(H)}}{A_{kp}^{(M)}} + P_{cd}^{(M)} \cdot \frac{A_{cd}^{(H)}}{A_{cd}^{(M)}} \right) \cdot \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M}$$

или

$$P_\Sigma^{(H)} \approx \gamma_{kp} \cdot P_{kp}^{(M)} + \gamma_{cd} \cdot P_{cd}^{(M)}, \quad (6)$$

где

$$\gamma_{\text{кр}} = \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_{\text{кр}}^{(H)}}{A_{\text{кр}}^{(M)}} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M},$$

$$\gamma_{\text{сд}} = \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_{\text{сд}}^{(H)}}{A_{\text{сд}}^{(M)}} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M},$$

индексы «кр» и «сд» относятся к покрытию из эмали ЭП-525 и покрытию «сэндвич». При выполнении четырех условий моделирования соотношение (6) характеризует динамику изменения давления в объеме КГЧ при термодеструкции органических материалов внутренних поверхностей ГО в полете.

Оценки $P_{\Sigma}^{(H)}$ проведены для вязкостного и молекулярного (как предельных) режимов вакуумирования объема КГЧ. Величина U_M определена опытным путем по контролируемому натеканию азота в рабочий отсек методом постоянного давления [4, 10] — $U_M \approx 0.0309 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость КГЧ U_H определялась как сумма проводимостей дренажных отверстий ГО и устройства 8 на рис. 1: $U_H \approx \mu_{\text{др}} U_{\text{др}} + \mu_{\Phi} U_{\Phi}$. Для перепада давления на фильтре $\Delta P \leq 5.8 \text{ Па}$ коэффициент расхода принят равным $\mu_{\Phi} \approx 0.0032$. Для дренажных отверстий и щелей КГЧ $\mu_{\text{др}} \approx 1.0$. Оценки выполнены для средних за $\Delta t \approx 930$ с значений парциальных давлений в модельном эксперименте $P_{\text{кр}}^{(M)} \approx 3.76 \text{ мПа}$ и $P_{\text{сд}}^{(M)} \approx 5.72 \text{ мПа}$ (рис. 6). При $A_{\text{кр}}^{(H)} \approx 22.5 \text{ м}^2$ и $A_{\text{сд}}^{(H)} \approx 13.0 \text{ м}^2$ условиям модельного эксперимента соответствует среднее суммарное давление в КГЧ $P_{\Sigma}^{(H)} \approx 0.389 \text{ Па}$ за $\Delta t \approx 930$ с.

Основными компонентами газовой смеси, образующейся при нагревании отверженных эпоксидных и фенольных смол до температуры 102 и 132 °С, являются тяжелые углеводороды с массовыми числами $m \approx 80, 82$ и 84 [1, 11]. Поэтому при расчетах $\lambda_{\text{ср}}$ использовались значения критического диаметра молекул тяжелых углеводородов из [5, 9]. Экспериментальные исследования общей потери массы образцов органических материалов и массы конденсированной фазы (КФ) летучих соединений газовыделения проводились с применением методик и требований стандарта ECSS-Q-70-01A [13].

Для снижения уровня газовыделений на практике проводится термовакуумная обработка (ТВО) узлов КГЧ — экспозиция при температуре +60° в течение 48 ч. В модельном экспери-

менте ТВО включала экспозицию испытуемых образцов в течение 48 ч при температуре +60° и давлении 1 мПа.

Доля конденсируемой фазы продуктов газовыделения эмали ЭП-525 составила: без ТВО — 0.024 % или $\mu_{\text{КФ}} \approx 22.08 \text{ мг}/\text{м}^2$ и 0.02 % после ТВО ($\mu_{\text{КФ}} \approx 18.41 \text{ мг}/\text{м}^2$). Для покрытия «сэндвич» соответственно — 0.114 % без ТВО ($\mu_{\text{КФ}} \approx 95.17 \text{ мг}/\text{м}^2$) и 0.062 % после ТВО ($\mu_{\text{КФ}} \approx 53.66 \text{ мг}/\text{м}^2$). Согласно стандарту ECSS-Q-70-01A уровень КФ из материалов для космического применения не должен превышать 0.1 %. Приведенные данные по сути характеризуют минимальные и максимальные плотности потоков КФ с поверхности КГЧ.

При среднем давлении в рабочем объеме КГЧ $P_{\Sigma}^{(H)} \approx 0.389 \text{ Па}$ для характерных размеров элементов конструкции КА и ГО рис. 1 (нижний параллелепипед — высота 1.8 м, в основании квадрат со стороной 1.1 м; верхний параллелепипед — высота 0.97 м, в основании квадрат со стороной 0.9 м; расстояние между стенками ГО и поверхностями КА около 0.95 м) число Кнудсена принимает значения $0.001 \leq Kn \leq 0.1$. Согласно [3] это соответствует режиму течения со скольжением — диффузной модели переноса частиц КФ в объеме КГЧ.

Для приближенной оценки осаждения потоков КФ газовыделений органических материалов КГЧ на поверхности КА может быть использовано решение задачи о диффузии потока частиц через слой вещества толщиной L (воздух между стенками ГО и поверхностями КА) [2, 8]. Предполагается, что частицы КФ рассеиваются только внутри слоя воздуха, а отклоненный поток уходит из рассматриваемого объема вследствие соударений КФ с молекулами воздуха. Реализуется стационарный режим.

Масса частиц КФ, осевших на поверхности 5, 6, 7 (рис. 1) КА площадью A_i за время Δt при термодесорбции их с поверхности КГЧ площадью A_k , определится выражением

$$M_{\Sigma_i} = \frac{\sum M_k^{(\text{КФ})} A_k}{A_i} f_i(Kn_i), \quad (7)$$

где $M_k^{(\text{КФ})}$ — поток массы КФ продуктов газовыделения с поверхности КГЧ площадью A_k за $\Delta t \approx 930$ с.

В приближении плоского слоя толщиной L для функции $f_{1i}(Kn_i)$ могут быть использованы решения [2]

$$f_{1i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + Kn_i^{-1}} = \frac{1}{1 + L_i/\lambda_{\text{КФ}}} \quad (8)$$

или

$$f_{2i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + \frac{4}{15} \frac{1}{BKn_i}} = \frac{1}{1 + 0.316 L_i/\lambda_{\text{КФ}}} \quad (9)$$

где $B = 38/45$ для многоатомных молекул КФ [8].

В приближении цилиндрического слоя между стенками ГО и поверхностями КА решение для функции $f_{3i}(Kn_i)$ может быть представлено в виде [8]

$$f_{3i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + 4/(15BKn_i) \ln R_K^{(\text{ГЧ})}/R_i^{(\text{КА})}} \approx \frac{1}{1 + 0.316 \lambda_{\text{КФ}}/R_i^{(\text{КА})} \ln R_K^{(\text{ГЧ})}/R_i^{(\text{КА})}}. \quad (10)$$

Здесь $R_i^{(\text{КА})}$ — характерный размер облучаемого элемента конструкции КА, $R_K^{(\text{ГЧ})}$ — характерный размер облучающего элемента конструкции КГЧ. Предполагается, что $R_i^{(\text{КА})} < R_K^{(\text{ГЧ})}$ и $T_w^{(\text{КА})} < T_w^{(\text{ГЧ})}$. Рассчитанные с использованием формул (7)–(10) значения массы частиц КФ, осевших на поверхностях 5, 6, 7 КА (рис. 1) за 930 с при выведении КГЧ на орбиту приведены в таблице.

При расчетах в $f_{3i}(Kn_i)$ для $R_i^{(\text{КА})}$ использовались значения эквивалентных радиусов — оснований элементов конструкции КА (верхнего и нижнего параллелепипедов).

Приведенные в таблице значения $M_{\Sigma i}$ свидетельствуют, что максимальные и минимальные

Масса $M_{\Sigma i}$ частиц КФ, осевших на поверхностях КА за 930 с при выведении КГЧ на орбиту

i	$M_{\Sigma i}, \text{ мг/м}^2$					
	$i = 5$		$i = 6$		$i = 7$	
	min	max	min	max	min	max
1	0.333	0.404	0.487	0.584	0.349	0.552
2	1.040	1.251	0.1386	1.663	0.949	1.501
3	—	—	0.908	1.0911	1.705	2.690

уровни молекулярного загрязнения поверхностей КА за 930 с полета из-за термодеструкции органических материалов КГЧ лежат в пределах от 0.333 до 2.690 мг/м^2 , что не хуже уровня чистоты A/3.6 стандарта MIL STD-1246C [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны расчетно-экспериментальные процедуры для инженерных оценок уровня чистоты и массы слоя молекулярного загрязнения поверхностей КА на этапах термостатирования КГЧ воздухом высокого давления заданного класса чистоты и выведения КГЧ на орбиту. Процедуры разработаны на основе и с применением методик и требований стандартов MIL STD-1246C и ECSS-Q-70-01A. Показано, что при термостатировании КГЧ ракеты-носителя «Днепр» воздухом класса чистоты $N_c = 5000$ предельные значения рассматриваемых параметров составляют: уровень чистоты поверхностей КА $120 \leq X_i \leq 150$, толщина слоя загрязнения $0.18 \leq l_{\Sigma} \leq 0.43 \text{ нм}$, масса слоя загрязнения (масло) $0.16 \leq M_{\Sigma} \leq 0.4 \text{ мг/м}^2$, что соответствует уровню молекулярного загрязнения поверхностей A/65 $\leq \xi \leq A/25$ согласно стандарту MIL STD-1246C. Масса частиц КФ, осевших на поверхностях КА вследствие термодеструкции органических материалов и покрытия поверхностей ГО за 930 с полета при выведении КГЧ на орбиту, лежит в пределах $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq 2.69 \text{ мг/м}^2$, что не хуже уровня чистоты $\xi \leq A/3.6$ в соответствии с MIL STD-1246C.

- Бишоп У. Ф., Минкович У. Дж. Скорость разложения фенольной смолы // Ракетная техника и космонавтика. — 1973. — 11, № 4.—С. 27—34.
- Байд Дж., Уотсон К., Уэлч Дж. Физическая теория газовой динамики. — М.: Мир, 1968.—556 с.
- Девиен М. Течение и теплообмен разреженных газов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962.—187 с.
- Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1964.—716 с.
- Жирифалько Р. Статистическая физика. — М.: Мир, 1976.—530 с.
- Климук П. И., Забелина И. А., Гоголев В. А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. — Л.: Машиностроение, 1983.—220 с.
- Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. — М: Сов. радио, 1975.—248 с.
- Кошмаров Ю. А., Рыжков Ю. А. Прикладная динамика

- разреженных газов. — М.: Машиностроение, 1977.—184 с.
9. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А. Н. Равделя, А. М. Пономаревой. — Л.: Химия, 1983.—232 с.
10. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. — Киев: Вища шк., 1981.—264 с.
11. Нейман М. Б., Кварская Б. М., Стрижкова А. С. и др. О механизме термической деструкции отверженных эпоксидных смол // Докл. АН СССР.—1960.—135, № 5.—С. 1147—1149.
12. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И., Письменный Н. И. Потери мощности солнечных батарей высокоорбитальных космических аппаратов из-за воздействия околоспутниковой среды // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 39—49.
13. ECSS-Q-70-01 A-2002. Space product assurance. Cleanliness and contamination control.
14. Tribble A. C., Boyadjian B., Davis J., et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community // NASA Contractor Report.—1996.—N 4740.—126 p.

MOLECULAR CONTAMINATION OF SPACECRAFT SURFACES IN THERMOSTATIC CONTROL AND ORBITAL INJECTION OF LAUNCH VEHICLE NOSE CONE

*V. A. Shuvalov, V. G. Tykhyy, L. P. Potapovych,
A. I. Pryimak, N. I. Pismenniy, G. S. Kochubey*

We developed calculation and experimental procedures for engineering evaluation of surface roughness levels and mass of spacecraft molecular contamination level in thermostatic control of the Dnepr LV's nose cone by high-pressure air and in orbital injection of the space head module. It is shown that spacecraft surface molecular contamination corresponds to $A/65 \leq \xi \leq A/25$ levels in thermostatic control of the space head module by air of a purity class of 5000, and the particle mass of condensed phase of volatile compounds deposited on spacecraft surfaces during 930 seconds of flight is within $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq 2.690 \text{ mg/m}^2$ in orbital injection, which is not worse than a purity level of $\xi \leq A/3.6$ according to the MILSTD 1246C standard.

УДК 536.3:681.586.5

Г. Ф. Горностаев, В. В. Пасичный, Г. В. Ткаченко

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, Київ

Методы контроля эксплуатационных характеристик теплозащиты волоконно- оптическими датчиками

Надійшла до редакції 03.11.06

Представлено результати розробки серії волокно-оптических датчиків для вимірювання таких експлуатаційних параметрів теплозахисту, як лінійне винесення маси, ефективний коефіцієнт поглинання, падаючий променевий тепловий потік. Досліджуються характеристики датчиків і обґрунтовається вибір алгоритмів вимірювання в умовах конвективного і радіаційного нагрівання. Доведено працездатність датчиків в умовах, що моделюють натурні умови роботи теплозахисного покриття.

Для получения реальных значений эксплуатационных характеристик теплозащиты КА последние снабжаются датчиками уноса теплозащитного материала (ТЗМ) и датчиками теплового потока на поверхность теплозащиты. Необходимость проведения таких измерений объясняется, недостаточной изученностью физических свойств ТЗМ при интенсивных тепловых нагрузках и острым дефицитом наземных испытательных стендов, способных в полной мере воспроизвести натурные условия работы изделия.

Основанием к выполнению проведенных разработок являлись заказы ведущих предприятий ракетно-космической отрасли (КБ «Южное», Московский институт теплотехники РАН, НПО «Энергия», ЦКБМ, КБ «Новатор»). Так, по заказу КБ «Новатор» (Россия) разрабатывались датчики уноса керамического наконечника изделия 63 Т6 («Стрела-2») для «системы последнего момента». Отсутствие надежных данных о термопрочностных свойствах керамики (ниасита) при эксплуатационных условиях (конвективный тепловой поток $Q = 500 \text{ МВт}/\text{м}^2$, температура $T = 4500 \text{ K}$, давление $P = 12 \text{ МПа}$) не позволяли

точно рассчитать изменение формы наконечника, а следовательно, аэродинамического сопротивления и траектории полета изделия.

Аналогичные разработки выполнялись по заказу предприятия ЦКБМ (Россия) для баллистических систем.

По заказу НПО «Энергия» (Россия) разработан датчик уноса низкосублимирующей теплозащиты (ТЗМ ТП-41К, ТТПС-15, фторопласт-4) для спускаемого аппарата типа «Марс-5» для условий: $Q = 1.6 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $T = 3000 \text{ K}$, $P = 40 \text{ кПа}$.

Анализ процесса прогрева и разрушения полупрозрачных материалов осложняется тем, что при их работе оптические свойства (ТЗМ) могут изменяться не только количественно, но и качественно.

Очень мало известно о влиянии на коэффициенты поглощения высоких температур и распределенных в теле неоднородностей в виде частиц других веществ (например, кокса).

Для оценки эффективности использования разрабатываемых ТЗМ необходимо иметь экспериментальные данные о текущем значении толщины ТЗМ, об изменении поглощающих

свойств материала при нагревании, о величине лучистой составляющей теплового потока, подводимого к поверхности ТЗМ.

Экспериментальная оценка трех указанных параметров с помощью специальных волоконно-оптических датчиков, которые устанавливаются в теплозащиту, была проведена на установках, моделирующих условия конвективного и радиационного нагрева ТЗМ.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОЗАЩИТЫ

Наиболее перспективным направлением работ по созданию датчиков линейного уноса массы (ДУМ) теплозащитного покрытия космического аппарата представляется разработка непрерывного оптико-электронного датчика, использующего световоды из стекол-светофильтров. Рассмотрим волоконно-оптический датчик (рис. 1), который включает два световода, установленных на всю толщину $H_0 = H + L_k$ теплозащитного покрытия перпендикулярно к нагреваемой поверхности. Их температура плавления близка к

температуре разрушения ТЗМ. Один световод (3) выполнен из прозрачного оптического стекла, другой (2) — из светофильтра с заданной оптической характеристикой фотоприемника. Для того чтобы оба фотоприемника работали в близком диапазоне значений фотосопротивления (на участках с одинаковой крутизной энергетической характеристики сохраняется постоянное отношение сопротивлений при данном отношении освещенностей), между прозрачным световодом и фотоприемником помещен компенсаторный фильтр 4. Этот фильтр пропускает столько же света, сколько наполовину сгоревший (до длины $L_k + 0.5H$) световод из светофильтра.

В процессе уноса исследуемого теплозащитного материала длина L_u цветного световода уменьшается. Отношение световых потоков на выходе цветного (J_u) и прозрачного (J_p) волоконно-оптических каналов является функцией длины цветного световода из светофильтра:

$$L_u = a + k_u^{-1} \ln(J_u/J_p), \quad (1)$$

где $a = L_k + 0.5H$, k_u — коэффициент поглощения материала цветного световода из светофильтра, H — величина линейного уноса ТЗМ.

Полученное соотношение является достаточно простым, и что особенно важно — инвариантным по отношению к величине падающего лучистого потока на разрушаемую поверхность теплозащитного материала. Спектральная чувствительность фотоприемника может быть рассчитана по кривой спектральной эффективности для излучения равной мощности и по зависимости фотосопротивления от мощности излучения, измеренного для одной из длин волн.

Для цветного световода введем постоянную пропускания Λ_j и постоянную сопротивления Λ_R , так что при изменении длины световода на величину Λ_j его пропускание изменяется в e раз; при изменении длины световода на величину Λ_R в e раз изменяется фотосопротивление. Для фотосопротивления СФЗ-1 в качестве материала цветного световода предпочтительным является светофильтр НС-3. Для компенсаторного фильтра можно использовать стекло НС-10, имеющее большой коэффициент поглощения (0.744) в области максимальной чувствительности

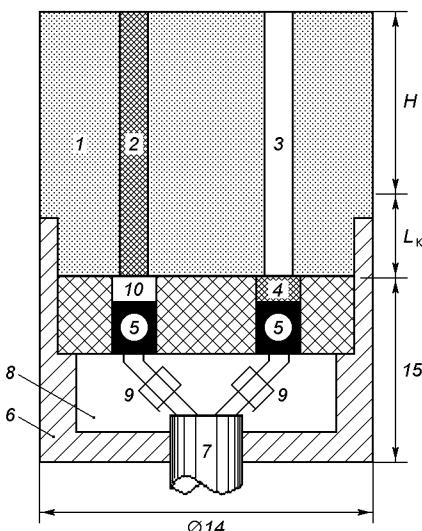


Рис. 1. Конструкция непрерывного ДУМ: 1 — ТЗМ, 2 — световод из светофильтра НС-3, 3 — прозрачный световод, 4 — фильтр НС-10, 5 — фотосопротивления СФЗ-1, 6 — корпус, 7 — электрический кабель, 8 — компаунд К-300, 9 — распайка СФЗ-1, 10 — прозрачное окно (H — величина линейного уноса массы, L_k — конечная толщина теплозащиты)

сти СФЗ-1. Результирующая энергия зарегистрированного излучения определяется произведением спектрального распределения энергии падающего излучения $W(\lambda)$, спектральной чувствительности $S(\lambda)$ фотоприемника и показателя пропускания $\tau_u(\lambda)$ светофильтра, а эффективная освещенность по всему спектру равна

$$J = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda) \tau_u(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены значения J , полученные методом численного интегрирования формулы (2) для СФЗ-1 и световодов различной длины из стекла НС-3, освещенных излучателем с цветовой температурой от 1000 до 2000 °C ($\lambda = 0.675\ldots1.2$ мкм). Из-за близкого совпадения спектральных характеристик световода и приемника освещение происходит в достаточно узкой спектральной полосе, и перераспределение энергии в спектре излучения при изменении цветовой температуры T_u не оказывает решающего влияния: полулогарифмические зависимости длины L_u от освещенности J при всех температурах имеют одинаковый наклон и близкие

значения постоянных Λ_j в линейной части зависимости. Наиболее существенно, что с изменением температуры и интенсивности освещения сохраняется практически одна и та же постоянная длины и постоянное соотношение между освещенностью в цветном канале определенной длины и в прозрачном канале. Эта стабильность позволяет сравнивать освещенности в прозрачном и цветном каналах инвариантно к интенсивности внешнего освещения.

Поскольку связь между освещенностью J и фотосопротивлением $R_{\text{фп}}$ нелинейная, то при расчете Λ_R учитывалась крутизна с логарифмической характеристикой для приближенного линейного ее участка $\lg R_{\text{фп}} = b - c \lg J$ ($\Lambda_R = \Lambda_j/c$); b и c — постоянные.

Градуировка непрерывного ДУМ проводилась путем последовательного укорачивания длины цветного световода L_u при освещении его входного торца ленточной лампой накаливания СИ 10—300 с яркостной температурой около 2000 °C. Полученная зависимость длины цветного световода от соотношения фотосопротивлений в цветном и прозрачном каналах аппроксимируется зависимостью, аналогичной теоретическому соотношению (1), но вместо отношения освещенностей фигурирует отношение фотосопротивлений в прозрачном и цветном каналах:

$$H = L_u = a_1 + c_1^{-1} \ln(R_n/R_u), \quad (3)$$

где a_1 , c_1 — постоянные.

Проведены стендовые испытания датчиков из сублимирующего ТЗМ (фторопласт-4) в струе газогенератора. Скорости разрушения ТЗМ и цветного световода практически совпадают, наличие световодов не оказывает влияния на разрушение поверхности фторопласта-4 в местах расположения оплавленных торцов световодов. Экспериментальные зависимости величины фотосопротивления от текущего значения длины цветного световода дают близкие значения постоянной длины ($\Lambda_R \approx 3.8$ мм) цветного световода для различных условий нагрева. Результаты измерения величины уноса фторопласта-4 с помощью ДУМ (рис. 3) с точностью до 10 % совпадают с данными киносъемки.

Выбраны две пары (легированное кварцевое стекло + фотоприемник) для непрерывного датчика уноса высокотемпературных ТЗМ (кварце-

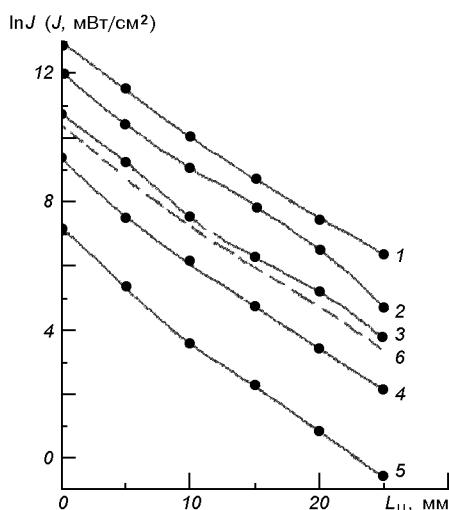


Рис. 2. Расчетная эффективная освещенность J фотосопротивления СФЗ-1 в зависимости от длины L_u световода из светофильтра НС-3 при различной цветовой температуре T_u излучателя: 1 — $\Lambda_j = 3.975$ мм, $T_u = 2000$ °C, 2 — $\Lambda_j = 3.65$ мм, $T_u = 1750$ °C, 3 — $\Lambda_j = 4.40$ мм, $T_u = 1500$ °C, 4 — $\Lambda_j = 3.78$ мм, $T_u = 1250$ °C, 5 — $\Lambda_j = 3.90$ мм, $T_u = 1000$ °C, 6 — средние значения

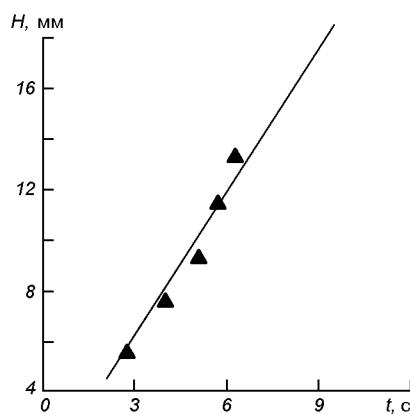


Рис. 3. Измеренные значения H линейного уноса массы фторопласта-4 в струе газогенератора: треугольники — результаты киносъемки, линия — данные датчика (тепловой поток $Q = 16 \text{ МВт}/\text{м}^2$, температура и давление торможения — $P_e = 550 \text{ кПа}$, $T_e = 5500 \text{ К}$)

вая керамика, асбо- и стеклопластик). Каждая оптоволоконная пара исследовалась на предмет зависимости величины сопротивления фотодиода от длины световода.

В качестве калиброванного источника излучения использовалась ленточная температурная лампа СИ10-300. Измерения проводились при яркостной температуре 2000°C путем последовательного укорачивания световодов и полировки обрезанного торца.

Результаты градуировки оптоэлектронных пар представлены на рис. 4.

Сочетание этих оптоэлектронных пар позволяет перекрыть значительную область возможных величин линейного уноса ТЗМ. Выбор пары зависит от конкретных условий испытания и типа ТЗМ.

ОЦЕНКА ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТЬ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

В реальных условиях работы теплозащитного покрытия задача численного расчета величины подводимого радиационного теплового потока (РТП) значительно усложняется, поскольку для этого необходимо знать термодинамические и оптические свойства газовой смеси в каждой точке слоя за скачком уплотнения, а также тепловые нагрузки в любой точке поверхности.

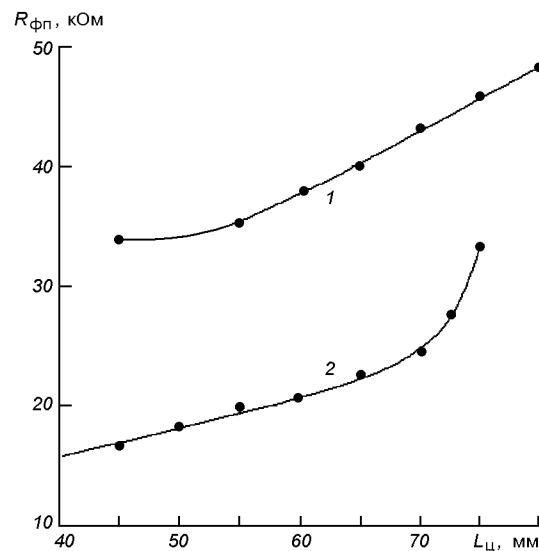


Рис. 4. Градуированные зависимости оптоэлектронных пар: 1 — фотодиод СФ2-5, световод из кварца КЛИ-1 ($\varnothing 1 \text{ мм}$); 2 — фотодиод СФ2-16, световод из кварца КЛСЗ-1 ($\varnothing 1 \text{ мм}$)

Анализ результатов [1, 2], полученных при испытании датчиков радиационного теплового потока со сквозным световодом в условиях радиационного нагревания на солнечном концентраторе СГУ-4) и конвективного нагревания на газогенераторе, свидетельствует о наличии трех характерных точек 1, 2, 3, определяющих динамику изменения величины светового потока на выходе «сквозного» световода в процессе его теплового разрушения (рис. 5). Эти точки соответствуют динамике процесса накопления тепла в поверхностном слое материала при его плавлении [3, 4]. Первая точка соответствует оплавлению световода, вторая точка — началу интенсивного свечения торца световода, третья — стабилизации светового сигнала в результате прогрева всего световода. Участок 2—2' на криевой II возник из-за медленного прогрева вглубь сублимирующего материала, а следовательно, и световода.

Часть падающего потока J_{wr} поглощается, а затем «высвечивается» жидкой пленкой стекла, поэтому величина светового потока на фотоприемнике $J_{\text{фп}}$ является результатом установления теплового равновесия излучений источника нагрева и торца световода. Чем больше величина

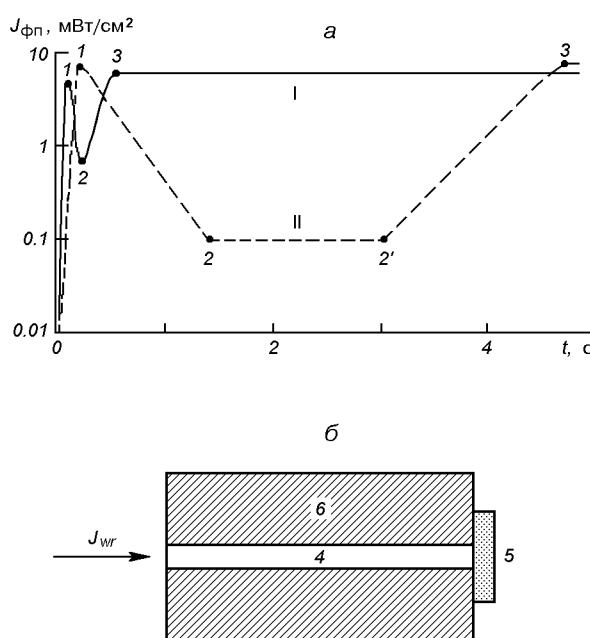


Рис. 5. Изменение потока $J_{\phi\pi}$ на приемнике датчиков РТП со «сквозными» световодами (а): I — газогенератор: ТЗМ АСД (конвективный тепловой поток $Q = 16 \text{ МВт}/\text{м}^2$, давление и температура торможения $P_e = 300 \text{ кПа}, T_e = 2900 \text{ К}$); II — СГУ-4: ТЗМ ТТПС-15 ($J_{wr} = 9.2 \text{ МВт}/\text{м}^2$); б — датчик РТП (J_{wr} — падающий поток, 4 — световод, 5 — приемник, 6 — ТЗМ)

подводимого радиационного потока J_{wr} , тем ярче светится оплавленный торец световода.

По энергетической характеристике фоторезистора СФЗ-1 для точек 1, 2, 3 (рис. 5, а) были определены значения световых потоков на фотоприемнике ($J_{\phi\pi 1} = 8 \text{ мВт}/\text{см}^2, J_{\phi\pi 2} = 0.1 \text{ мВт}/\text{см}^2, J_{\phi\pi 3} = 8.5 \text{ мВт}/\text{см}^2$), а также показатели светопропускания холодного световода ($\tau = 0.83$) и оплавленного световода ($\tau_* = 0.102$). По ним были рассчитаны показатель светопропускания τ_{nc} пограничного слоя над поверхностью ТЗМ и интенсивность J_{cb} собственного теплового излучения световода:

$$J_{wr} = \frac{J_{\phi\pi 1}}{\tau} = \frac{8 \text{ мВт}/\text{см}^2}{0.83} = 9.638 \text{ мВт}/\text{см}^2.$$

$$\tau_{nc} = \frac{J_{\phi\pi 2}}{J_{wr} \tau_*} = \frac{0.1 \text{ мВт}/\text{см}^2}{9.638 \text{ мВт}/\text{см}^2 \cdot 0.102} = 0.104.$$

$$J_{cb} = J_{\phi\pi 3} - J_{wr} \tau_{nc} \tau_* = 8.4 \text{ мВт}/\text{см}^2.$$

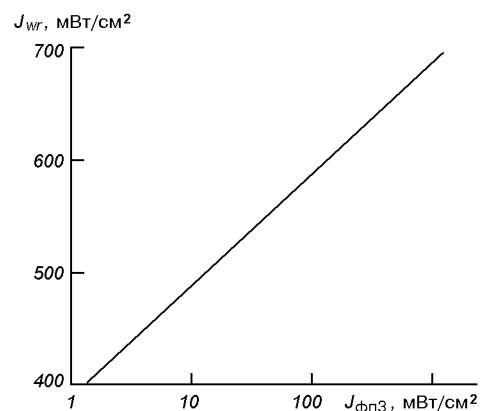


Рис. 6. Градуировочная зависимость датчика РТП со сквозным световодом: J_{wr} — падающий поток, $J_{\phi\pi 3}$ — световой поток на фотоприемнике

Для штатного сублимирующего материала ТП-41К проведена градуировка датчика РТП со сквозным стеклянным световодом на установке «Уран» (рис. 6). Световой поток $J_{\phi\pi 3}$ соответствует стабилизированному значению потока на фотоприемнике после оплавления торца световода. Получена линейная зависимость $J_{\phi\pi 3}$ от J_{wr} . Флуктуация параметра $J_{\phi\pi 3}$ не превышает 3 %. Точность градуировки определяется в основном погрешностью задания величины J_{wr} в фокальном пятне $\varnothing 1 \text{ мм}$ (диаметр световода) и составляет около 10 % [3].

КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПОГЛОЩАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

Для экспериментальной оценки эффективного коэффициента поглощения материала (ЭКП), включающего влияние продуктов разрушения ТЗМ, предложен метод измерения и разработан датчик (рис. 7) для его реализации. Датчик включает сквозной стеклянный световод, два «внутренних» световода, три фотосопротивления СФЗ-1, а также исследуемый полупрозрачный сублимирующий материал (ТТПС-15) и непрозрачный экран из асбопластика. Сквозной световод 1 служит для оценки падающего лучистого потока, «внутренний» световод 2 — для оценки лучистого потока, прошедшего через слой про-

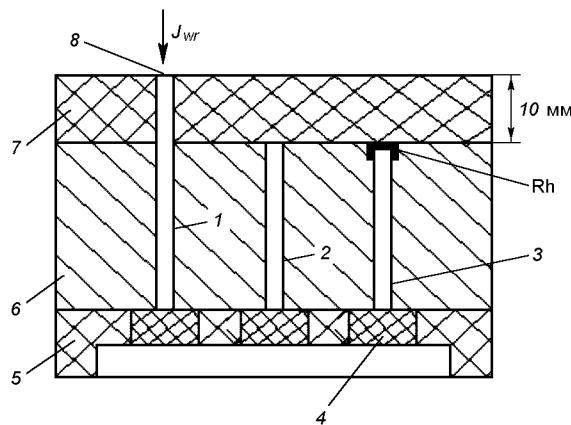


Рис. 7. Датчик ЭКП теплозащиты: Rh — пленка родия, J_{wr} — падающий лучистый поток, 1 — сквозной световод, 2 — «внутренний» световод, 3 — световод с пленкой родия, 4 — фоторезистор, 5 — втулка, 6 — ТЗМ АСД, 7 — ТЗМ ТТПС-15

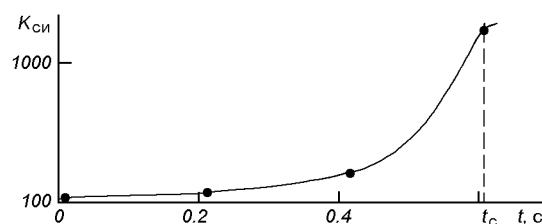


Рис. 8. Изменение K_{ci} материала ТТПС-15 при лучистом нагреве на СГУ-4: $J_{wr} = 920 \text{ Вт}/\text{см}^2$

дуктов сублимации и слой исследуемого ТЗМ; световод 3, торец которого покрыт пленкой родия, необходим для оценки собственного теплового излучения световода. Диаметр световодов равен 1 мм.

Погрешность измерения величины ЭКП определяется в основном погрешностью определения отношения световых потоков на выходе световодов по энергетической характеристике СФЗ-1 (примерно 15 %).

При нагревании материала ТТПС-15 происходит коксование поверхности ТЗМ (материал «дымит»). Измеренное датчиком с «внутренним» световодом 2 время, за которое сигнал датчика стабилизируется, составило $t_c = 0.6$ с (рис. 8).

За время проведения измерений толщина слоя ТТПС-15 (10 мм) практически не изменилась

вследствие малой скорости уноса ТЗМ.

Для характеристики поглощающих свойств системы, которую составляют газообразные продукты сублимации и слой ТЗМ, используется эффективный коэффициент K_{ci} поглощения системы (рис. 8). Если обозначить выражением K_{t3m} коэффициент поглощения слоя ТЗМ, K_{nc} — коэффициент поглощения пограничного слоя, J_c — стабилизированное значение светового потока, упавшего на торец «внутреннего» световода без пленки родия, имеем

$$K_{ci} = K_{t3m} K_{nc},$$

$$K_{nc} = \tau_{nc}^{-1} = 9.6,$$

$$K_{t3m} = \frac{J_{wr}}{J_c} = \frac{9.638 \text{ мВт}/\text{см}^2}{6.5 \text{ мкВт}/\text{см}^2} = 1480,$$

$$K_{t3m} = 153.9.$$

Следовательно, основной вклад в поглощение системы вносят не газообразные продукты сублимации ТТПС-15, а тонкий коксовый слой на поверхности ТЗМ, появление которого через время $t_c = 0.6$ с на порядок снижает интенсивность лучистого нагрева внутри полупрозрачного ТЗМ.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы экспериментального определения с помощью волоконно-оптических датчиков текущего значения толщины H ТЗМ, эффективного коэффициента K_{ci} поглощения, лучистого теплового потока J_{wr} на уносимую поверхность ТЗМ:

$$H = a_1 + C_1^{-1} \ln(R_n/R_{n0})$$

$$K_{ci} = J_{wr}/J_c(t_c) = K_{t3m} K_{nc},$$

$$J_{wr} = (J_{\phi n3} - J_{cb})/\tau_* \tau_{nc}$$

Экспериментальное определение датчиками указанных параметров в процессе летных испытаний изделий ракетно-космической техники позволит увеличить надежность проектирования теплозащиты.

2. Керамические наконечники с датчиками уноса признаны годными к комплектации изделий 63 Т6 предприятия КБ «Новатор» (Россия).

1. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Метод измерения лучистой составляющей теплового потока на поверхности керамической теплозащиты // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.— С. 98—102.
2. Горностаев Г. Ф., Теплякова О. А. Применение световодов для выделения лучистой составляющей теплового потока // Порошковая металлургия.—1996.—№ 5/6.— С. 48—51.
3. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1975.—224 с.
4. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. — М.: Наука, 1977.—176 с.

METHODS FOR CONTROL OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION DEVICES BY FIBER-OPTICAL SENSORS

G. F. Gornostaev, V. V. Pasichny, G. V. Tkachenko

The data are represented concerning the development of the series of the fiber-optical sensor intended for measuring such operational parameters of thermal insulation devices as the value of linear ablation, effective absorption coefficient, incident radiant flux. The data are given concerning the investigation of the sensors characteristics and the selection of the algorithms is grounded for measuring under conditions of convection and radiant heating. The sensors operating capacity is proved under conditions which model full-scale conditions of thermal insulation coating operating.

УДК 537.591

О. В. Доценко, В. Я. Дмитренко, В. Б. Тарасов, Ю. А. Шовкопляс

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Метод расчета интенсивности одиночных событий с учетом реальной защищенности интегральных схем в местах их размещения внутри космического аппарата

Надійшла до редакції 15.05.06

Подастися метод розрахунку інтенсивності одиночних подій, що використовується у роботах із забезпечення стійкості космічних апаратів до впливу іонізаційного випромінювання. Метод дозволяє розраховувати інтенсивність одиночних подій з урахуванням реального розподілу захистів у місці розташування інтегральної схеми всередині космічного апарату. Результати розрахунку зіставлено із результатами, отриманими з використанням стандартної моделі CREME-96.

Эффект одиночных событий (ОС), обнаруженный в радиоэлектронной аппаратуре космического аппарата (КА) в середине 1970-х гг., до настоящего времени продолжает оставаться одной из главных проблем для безопасного функционирования КА на орбите. Его сущность состоит в том, что заряд, собранный с трека частицы при ее прохождении сквозь активную область полупроводникового прибора, в ряде случаев может инициировать изменение его логического состояния (одиночный сбой), или необратимое повреждение (зашелкивание, выгорание, пробой подзатворного диэлектрика). Достаточно отметить, что по результатам предварительного анализа [7] на долю ОС приходится 28.4 % случаев нештатного функционирования бортовой аппаратуры зарубежных КА, ассоциированных с воздействием факторов космического пространства. Наиболее известные примеры деструктивного проявления ОС — потеря КА MSTI (1993) и IRON 9906 (1997). В остальных случаях эффект ОС чаще всего проявляется в виде фантомных команд и искажения данных.

Для того чтобы адаптировать КА к функционированию в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП), инициирующих ОС, необходимо провести комплекс работ по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры к этому эффекту. Под стойкостью в данном случае понимают свойство приборов и подсистем КА сохранять свои функциональные характеристики в процессе и после воздействия ИИКП на уровне требований, заданных в технических заданиях. В самом общем виде проблема обеспечения стойкости КА к ИИКП сводится к решению двух равнозначных по приоритетности задач:

- разработка требований по стойкости,
- подтверждение выполнения заданных требований расчетными или экспериментальными методами.

В настоящей статье будет рассмотрена первая задача.

Неточности в формулировке требований по стойкости к ИИКП могут иметь самые серьезные последствия: заниженные требования уве-

личивают риск отказа комплектующих элементов; завышенные ведут к неоправданному снижению функциональных и габаритно-массовых характеристик подсистем, увеличению их стоимости и сроков изготовления. Корректная формулировка требований по стойкости к ИИКП, напротив, позволяет с правильных позиций подходить к выбору комплектующих элементов и избегать непродуктивного расходования ресурса массы КА для создания дополнительных радиационных защит.

В современных КА, где плотность размещения бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) очень высока, даже небольшие изменения конструкции или компоновки существенным образом сказываются на защищенности большого числа комплектующих элементов, входящих в состав различных подсистем. Часто имеет место ситуация, когда недостаток или избыток защиты для какого-либо прибора становится следствием конструкционных изменений в составе соседнего блока бортовой РЭА. В связи с этим при разработке требований по стойкости следует включать в рассмотрение все элементы конструкции и бортовой аппаратуры КА, представляющие сколь-нибудь значимую защиту на пути проникновения частиц ИИКП к точке размещения критичного элемента. Кроме того, поле защит вокруг каждого критичного элемента следует постоянно контролировать, чтобы в процессе проектирования добиваться его оптимальной конфигурации.

Применительно к задаче обеспечения стойкости к одиночным событиям эти требования не могут быть выполнены должным образом. Единственным доступным инструментом для разработки требований по стойкости к ОС в настоящее время является модель CREME-96 [3, 8], которая позволяет по известным показателям стойкости ИС рассчитывать интенсивность ОС в зависимости от параметров орбиты КА, состояния солнечной активности и величины защиты.

В модели CREME-96 реализованы две независимые ветви расчета интенсивности ОС: для ионной и для протонной составляющих ИИКП. Это связано с тем, что физические механизмы инициирования ОС для ионов и протонов не идентичны. В первом случае эффект происходит вследствие прямой ионизации активной области ИС при прохождении сквозь нее иона ИИКП.

Во втором ионизацию производят продукты взаимодействия протонов с атомами кристаллической решетки материала ИС (тормозная способность протонов не настолько велика, чтобы инициировать ОС посредством механизма прямой ионизации).

В рамках модели CREME-96 интенсивность ОС, вызванных протонами, рассчитывают по формуле

$$\nu = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} F(E)\sigma(E)dE, \quad (1)$$

где ν — интенсивность ОС, $F(E)$ — дифференциальный спектр протонного излучения в точке размещения ИС, $\sigma(E)$ — поперечное сечение сбоев ИС под воздействием протонного излучения, определяемое по результатам испытаний в соответствии с требованиями стандартов [4, 6], E_{\min} , E_{\max} — минимальная и максимальная энергии частиц в спектре. Зависимость $\sigma(E)$ обычно аппроксимируют двухпараметрической функцией Бендела:

$$\sigma(E) = (B/A)^{14} [1 - \exp(-0.18Y^{1/2})]^4, \\ Y = \begin{cases} (E-A)(18/A)^{1/2}, & E > A, \\ 0, & E \leq A, \end{cases} \quad (2)$$

где A, B — параметры аппроксимации.

Интенсивность ОС под воздействием ионов ИИКП вычисляют интегрированием произведения дифференциального спектра линейной передачи энергии (ЛПЭ) ионов и интегрального распределения длин треков ионов в чувствительной области ИС:

$$\nu = \frac{S}{4} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} F(L)P(L)dL, \quad (3)$$

где ν — интенсивность ОС под воздействием ионов, S — площадь поверхности чувствительной области, $F(L)$ — дифференциальный спектр ЛПЭ ионов в точке размещения ИС, $P(L)$ — интегральное распределение длин треков ионов в чувствительной области ИС; L_{\min} , L_{\max} — минимальное и максимальное значения ЛПЭ ионов в спектре.

Значение площади поверхности чувствительной области S , а также функцию $P(L)$ определяют согласно стандартам [4, 6].

В модели CREME-96 в рассмотрение могут быть принятые ионы солнечных и галактических космических лучей с атомными номерами в диапазоне от $Z = 2$ (гелий) до $Z = 92$ (уран). Каждый из этих компонентов имеет спектральное распределение, трансформацию которого необходимо учитывать при прохождении ионов сквозь материалы защит. Для упрощения решения этой задачи все спектры ионов ИИКП сведены в единый спектр ЛПЭ, характеризующий количество ионов в диапазоне $[L, L + \Delta L]$, независимо от их атомного номера.

Чувствительная область определена как пространство, внутри которого заряд, образованный вдоль трека частицы, посредством механизмов дрейфа и диффузии может быть перенесен к электродам и инициировать ОС. В модели CREME-96 чувствительную область задают в виде прямоугольного параллелепипеда. Интегральное распределение длин треков ионов характеризует их количество в чувствительной области ИС, для которых при заданном значении L происходит ОС.

Не вдаваясь в детали принятых в рамках модели CREME-96 допущений и ограничений, приведем главные из присущих ей недостатков, отмеченных в [2]:

- модель CREME-96 не дает возможности адекватно учитывать распределение защит в окрестности точек размещения ИС;
- в рамках модели CREME-96 невозможно учсть анизотропию космических излучений, инициирующих ОС;
- чувствительные области ИС, накопление заряда в которых инициирует ОС, не могут иметь форму, отличную от прямоугольного параллелепипеда;
- в рамках модели CREME-96 невозможно моделировать многократные ОС, когда одна частица инициирует сбои в нескольких чувствительных областях.

Попытки решить эти проблемы путем прямого моделирования по методу Монте-Карло [5] нельзя признать успешными, поскольку даже для самых простых геометрий время решения задачи неприемлемо велико. Ниже мы представляем результаты решения задачи расчета интенсивности ОС с использованием методологии секторного анализа, применение которой позволяет избежать отмеченных выше недостат-

ков, присущих модели CREME-96.

Метод секторного анализа в настоящее время достаточно хорошо апробирован, и с успехом используется при расчете общей и неионизационной доз ИИКП. Его суть состоит в том, что пространство вокруг критичного элемента разбивают на заданное количество пространственных угловых секторов. В каждом из секторов определяют суммарную защиту X_i , которую частице необходимо преодолеть, чтобы попасть в точку, где находится критичный элемент. Затем по предварительно рассчитанным зависимостям доза-защита находят дозы D_i ИИКП, накопленные за защитой X_i . Искомые значения доз ИИКП в заданной точке внутри КА определяют суммированием по всем угловым секторам в телесном угле 4π :

$$D = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N D_i \omega_i, \quad (4)$$

где N — заданное число угловых секторов, D_i — доза ИИКП, накопленная за защитой X_i , ω_i — величина телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе.

Рис. 1 иллюстрирует геометрию задачи расчета характеристик радиационных воздействий с использованием методологии секторного анализа.

Для того чтобы иметь возможность оптимальным образом спроектировать защиту критичных элементов подсистем КА от воздействия ИИКП, в практике работ ГКБ «Южное» предусмотрена

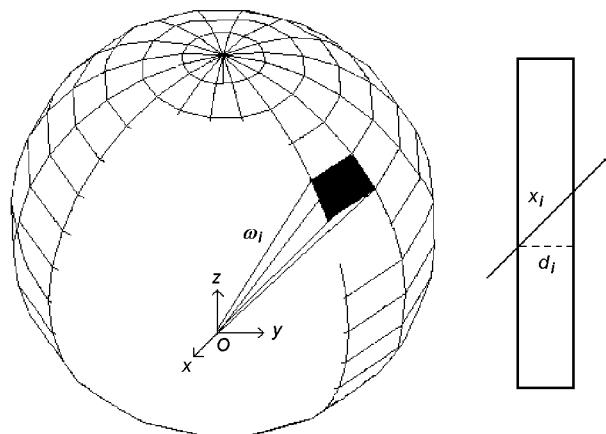


Рис. 1. Геометрия задачи расчета характеристик радиационных воздействий с использованием методологии секторного анализа

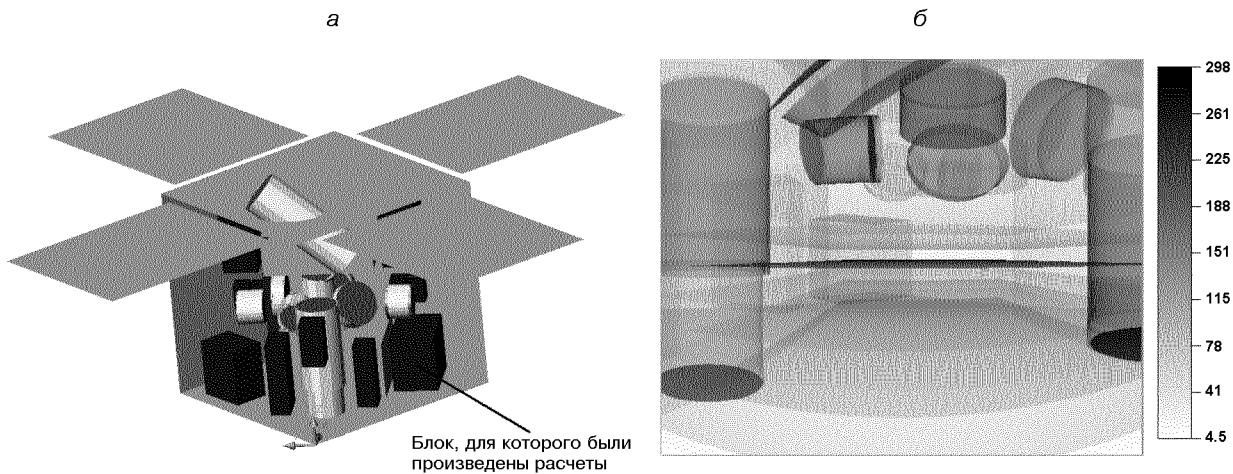


Рис. 2. Радиационная 3D-модель КА (а) и рассчитанное по ней распределение защит (б)

разработка радиационной 3D-модели КА. Эта модель, создаваемая в среде Autodesk AutoCAD Mechanical Desktop, позволяет визуализировать распределение защит и доз вокруг заданной точки, идентифицировать угловые сектора, где защита минимальна, и проектировать радиационную защиту с минимальными затратами ресурса массы КА. Отметим, что такой подход не является уникальным: аналогичные решения для обеспечения стойкости к дозе ИИКП сегодня использует большинство зарубежных разработчиков КА [3]. Пример радиационной 3D-модели КА и рассчитанного с ее помощью распределения защит в окрестности указанной точки приведен на рис. 2 (распределение защит приведено в угловом секторе $2\pi/3$ в положительном направлении оси y).

Для вычисления интенсивности ОС, инициированных протонами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа был реализован следующий расчетный алгоритм:

- задается количество угловых секторов, в которых определяется защита (в практике работ ГКБ «Южное» это значение варьируется от $6 \cdot 10^4$ до $1.5 \cdot 10^6$ в зависимости от геометрии задачи);
- рассчитывается X_i -защита в i -м угловом секторе;
- находится дифференциальный спектр протонов ИИКП за защитой X_i . Для решения этой задачи используются предварительно рас-

читанные по модели CREME-96 спектры протонов ИИКП для заданной орбиты за различными защитами. Искомый спектр за защитой X_i находится методом интерполяции. Пример набора данных для этих вычислений представлен на рис. 3;

- определяется величина ω_i телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе;
- с помощью формулы (1) определяется v_i — интенсивность ОС под воздействием протонов ИИКП, достигающих ИС из i -го углового сектора;
- искомая интенсивность ОС под воздействием протонов ИИКП находится суммированием значений v_i по всем угловым секторам в телесном угле 4π .

Результаты расчетов, полученные с использованием представленного выше подхода, были сопоставлены с аналогичными результатами расчетов по модели CREME-96. В последней фактически воспроизводится случай размещения ИС в геометрическом центре сплошной алюминиевой сферы. При этом учет неравномерности распределения защит может быть произведен путем импорта в программу CREME-96 файла, содержащего исходные данные по относительному содержанию величин защит в 30 интервалах, перекрывающих диапазон от минимального до максимального значений. Такой файл был сгенерирован для точки, расположенной в геометрическом центре блока, указанного на рис. 2,

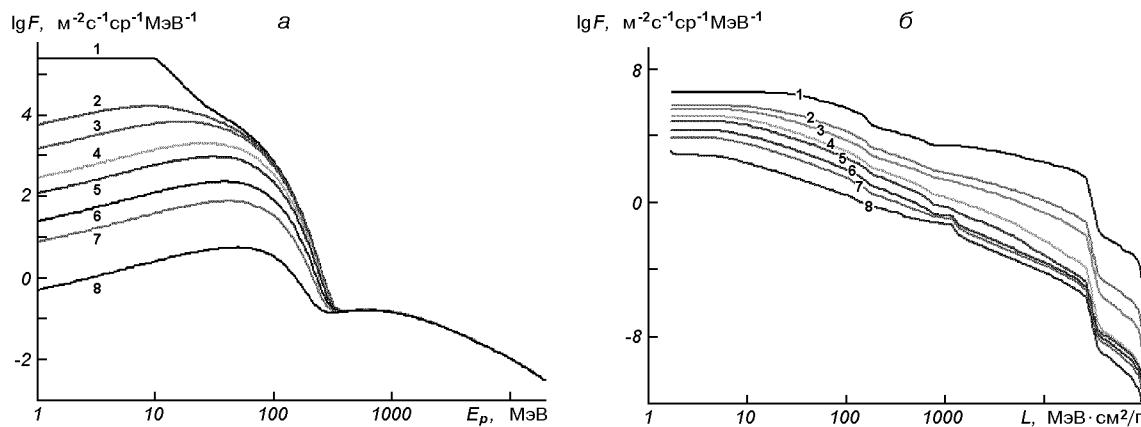


Рис. 3. Спектры протонов (а) и ионов (б) ИИКП за защитами, используемые для расчета интенсивности ОС по методу секторного анализа

что дало возможность сопоставить результаты расчетов с использованием 3D-модели КА и по модели CREME-96 как для случая однородных, так и для распределенных защит.

Для расчетов были использованы следующие исходные данные:

- высота круговой орбиты $H = 650$ км,
- наклонение орбиты $i = 98^\circ$,
- параметры аппроксимации зависимости $\sigma(E)$: $A = 12$, $B = 24$.

Рассмотрены два варианта внешнего радиационного окружения:

- минимум солнечной активности, солнечных вспышек нет,
- пиковые 5 мин аномального события октября 1989 г.

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Для однородных защит имеет место практически

полное совпадение результатов, что неудивительно, поскольку реализованный подход не выходит за рамки формализма модели CREME-96. Некоторое расхождение результатов для случая распределенных защит может объясняться тем, что в модели CREME-96 использованы только 30 фиксированных значений защит, в то время как в расчетах с использованием 3D-модели КА их число не ограничивается. В этих условиях, чем выше градиент кривой спектрального распределения частиц, тем более значительным окажется расхождение результатов. По этой причине для варианта внешнего радиационного окружения «пиковые 5 мин» расхождение результатов выше по сравнению с аналогичными результатами для спокойных геомагнитных условий.

Для расчета интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа был разработан следующий расчетный алгоритм.

- Пользователь задает количество N угловых секторов, в которых определяется защита.
- Производится расчет X_i -защиты в i -м угловом секторе.
- Находится величина ω_i телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе.
- Определяется интегральный спектр ЛПЭ ионов ИИКП за защитой X_i . Как и в предыдущем случае, для решения этой задачи используются предварительно рассчитанные по модели CREME-96 спектры ЛПЭ

Таблица 1. Интенсивности ОС, инициированных протонами ИИКП, рассчитанные с использованием программы CREME-96 и 3D-модели КА

X , мм Al	Интенсивность ОС, $10^{-7} \text{ с}^{-1} \text{ бит}^{-1}$			
	без вспышек		пиковые 5 мин	
	CREME-96	3D-модель	CREME-96	3D-модель
1	5.069	5.069	973.0	973.0
5	4.534	4.534	499.0	499.0
10	4.057	4.057	319.2	319.2
30	2.848	2.848	12.30	12.30
50	2.126	2.126	69.83	69.81
100	1.181	1.181	28.21	28.20
точка	4.283	4.298	495.5	588.4

ионов ИИКП для заданной орбиты за различными защитами. Искомый спектр ЛПЭ ионов за защитой X_i находят методом интерполяции. Пример набора данных для этих вычислений представлен на рис. 3.

- На гранях чувствительной области ИС с заданным шагом M разбивается сетка.
- Определяется, какие из граней чувствительной области ИС освещены при приходе иона из углового сектора, где определена защита X_i .
- В узлах сетки освещенных граней находятся длины треков ионов, приходящих из углового сектора, где определена защита X_i , в чувствительной области ИС.
- В спектре ЛПЭ ионов определяется количество $F_j(L)$ частиц, которые инициируют ОС при прохождении внутри чувствительной области ИС по треку с найденной длиной.
- Находится площадь S_j ячейки сетки, разбитой на поверхности чувствительной области ИС.
- Находится угол α между нормалью к поверхности чувствительной области ИС и направлением прихода иона.
- Результирующую интенсивность v ОС, инициированных ионами ИИКП, находим суммированием по всем угловым секторам в телесном угле 4π :

$$v = \sum_{i=1}^N \omega_i \sum_{j=1}^M F_j(L) S_j \cos(\alpha). \quad (5)$$

Использование методологии секторного анализа, применительно к задаче определения интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, иллюстрирует рис. 4.

Для верификации предложенного метода, как и в предыдущем случае, результаты расчетов с использованием 3D-модели КА были сопоставлены с аналогичными результатами расчетов по программе CREME-96.

Для расчетов были использованы следующие исходные данные: высота круговой орбиты $H = 650$ км, наклонение орбиты $i = 98^\circ$, пороговая ЛПЭ возникновения ОС — 20 МэВ·см 2 /г, попечное сечение насыщения сбоев — 25 мкм 2 , толщина чувствительной области ИС — 5 мкм.

Рассмотрены два варианта внешнего радиационного окружения:

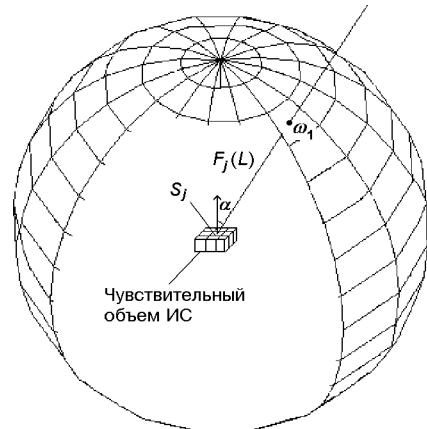


Рис. 4. Геометрия задачи расчета интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа

Таблица 2. Интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, рассчитанные с использованием программы CREME-96 и 3D-модели КА

X, мм Al	Интенсивность ОС, 10^{-14} с $^{-1}$ бит $^{-1}$			
	без вспышек		пиковые 5 мин	
	CREME-96	3D-модель	CREME-96	3D-модель
1	7.834	7.795	1011000	1007000
5	6.797	6.763	2962	2948
10	5.439	5.412	371.6	369.8
30	3.016	3.00	14.01	13.94
50	1.967	1.957	2.562	2.548
100	0.8198	0.8153	0.1965	0.1954
точка	6.354	6.168	94900	171000

- минимум солнечной активности, солнечных вспышек нет,
- пиковые 5 мин аномального события октября 1989 г.

Результаты расчетов для случаев однородных защите заданной толщины, а также для точки внутри блока, указанного на рис. 2, приведены в табл. 2.

Несмотря на существенные различия в расчетных алгоритмах обеих программ, как и в предыдущем случае, степень совпадения результатов для однородных защите вполне удовлетворительна, в то время как учет реальной защищенности ИС приводит к заметному расхождению результатов. Причиной этого расхождения, по всей видимости, является более тщательный учет

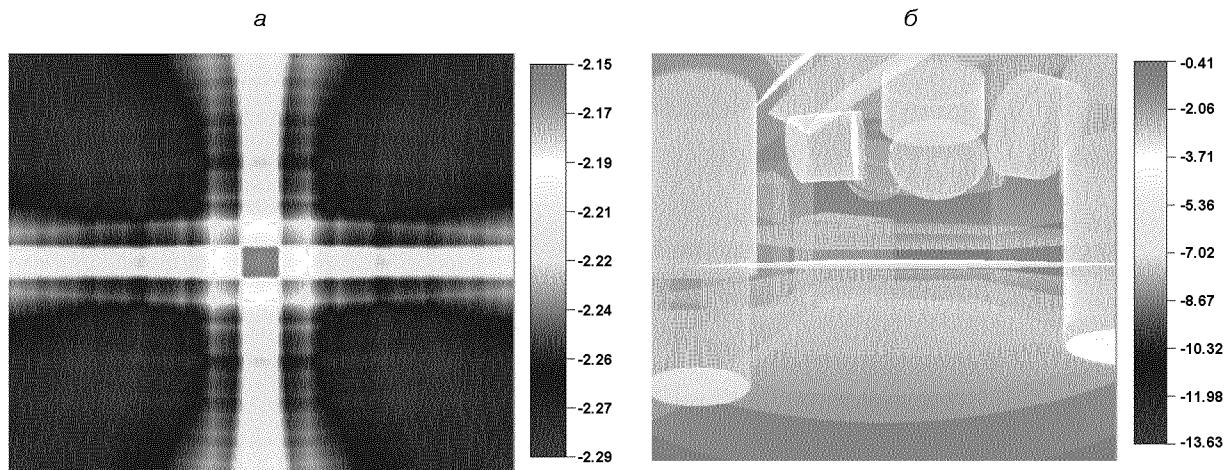


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности ОС: *а* — за однородной защитой, *б* — в точке, указанной на рис. 2

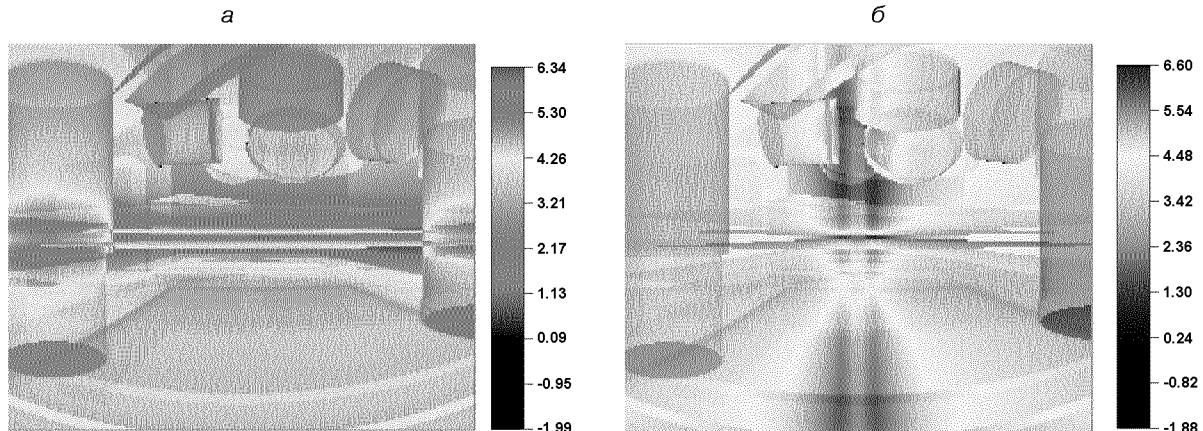


Рис. 6. Пространственное распределение интенсивности ОС при горизонтальном (*а*) и вертикальном (*б*) размещении ИС Fairchild 93L422 в точке, указанной на рис. 2

распределения защит при расчетах с использованием 3D-модели КА по сравнению с моделью CREME-96.

На рис. 5 представлены пространственные распределения интенсивности ОС в угловом секторе $2\pi/3$ для случая однородной защиты (чувствительная область находится в геометрическом центре сферы, как на рис. 4) и для точки, указанной на рис. 2. Как видим, даже при однородном распределении защит интенсивность ОС существенным образом зависит от ориентации кристалла ИС. В рассмотренном примере интенсивность ОС увеличивается в тех случаях, когда направление прихода частиц приближает-

ся к диагоналям чувствительной области, имеющей в рассмотренном случае форму куба. (Здесь длины треков частиц максимальны, и значит, частицы с меньшей энергией могут инициировать ОС). При наложении на эту картину распределенного поля защит может иметь место ситуация, когда угроза ОС будет исходить из секторов, где защита не будет минимальной.

На рис. 6 приведены результаты расчета интенсивности ОС для двух вариантов размещения ИС Fairchild 93L422 в геометрическом центре блока, изображенного на рис. 2. В первом случае платы, на которой размещена ИС, лежит в плоскости xy , во втором — xz . Параметры

стойкости ИС Fairchild 93L422 к ОС, инициированным ионами ИИКП, взяты из работы [1]. Ожидаемая интенсивность ОС, рассчитанная по формуле (5), составила в первом случае $2.237 \cdot 10^{-5}$ бит $^{-1}$ с $^{-1}$, во втором — 1.404 бит $^{-1}$ с $^{-1}$. При этом, как видно из рис. 6, в первом случае основная засветка идет из секторов, расположенных в азимутальной плоскости, а во втором случае — в угломестной. То есть, если бы потребовалась защита этой ИС, ее оптимальное размещение напрямую зависело бы от ориентации кристалла ИС.

Учесть анизотропию потоков ионов ИИКП, действующих на КА, можно двумя способами: задавая бесконечную защиту в секторах, откуда не могут появляться ионы (например, со стороны Земли), или, создавая несколько наборов данных по спектральному распределению частиц за защитами, привязав их к заданным секторам.

Интенсивность многократных ОС с использованием методологии секторного анализа можно рассчитать, моделируя случаи пересечения ионом, приходящим из заданного сектора, двух и более чувствительных областей.

Расчет интенсивности ОС для случая произвольной формы чувствительной области ИС в рамках предложенного подхода сводится к решению геометрических задач наложения на эту область сетки с заданным шагом и определения длин треков ионов, приходящих в заданную точку чувствительной области под известным углом.

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно расширить возможности моделирования ОС, инициированных ионами и протонами ИИКП. В его рамках обеспечивается возможность учитывать факторы, которые не могут быть приняты в расчет при использовании стандартной модели CREME-96.

Помимо этого, объединение в рамках единой радиационной 3D-модели КА комплекса задач обеспечения стойкости к общей дозе, неионизационной дозе, внутренней электризации и одиночным событиям позволит с единых методологических позиций подходить к обеспечению

стойкости КА к ИИКП, обеспечивать непрерывный контроль требуемого уровня защищенности критичных элементов на протяжении всего процесса создания КА и добиваться оптимальной конфигурации всех защит, образуемых элементами конструкции и бортовой аппаратуры.

1. Кузнецов Н. В., Ныммик Р. А. Радиационные одиночные сбои микроэлектроники космических аппаратов, обусловленные событиями солнечных космических лучей // Космич. исслед.—1997.—35, № 5.—С. 465—479.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 2004.—320 с.
3. ECSS-E-10-04. Space Engineering. Space Environment. — Noordwijk, The Netherlands, ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 2000.—196 p.
4. ESA/SCC basic specification N 25100. Single event test method and guidelines. — European Space Agency, 1995.—23 p.
5. Inguimbert C., Duzellier S. SEU rate calculation with GEANT4 (Comparison with CREME-86) // IEEE Trans. Nucl. Sci.—2004.—51, N 5.—P. 2805—2810.
6. JESD89. Measurement and reporting of alpha particles and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices. — JEDEC Solid State Technology Association, 2001.—64 p.
7. Koons H. C., Mazur J. E., Selesnic R. S., et al. The impact of the space environment on space systems // Aerospace Report N TR-99(1670)-1, prepared by Space and Missile Systems Center, L. A. 1999.—202 p.
8. Tylka A. J., Adams J. H., Boberg P. R., et al. CREME96: a revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1997.—44, N 6.—P. 2150—2160.

SINGLE EVENT EFFECT CALCULATION METHOD TAKING INTO CONSIDERATION REAL PROTECTION OF INTEGRAL CIRCUITS INSIDE A SATELLITE

*O. V. Dotzenko, V. Ya. Dmitrenko, V. B. Tarasov,
Yu. A. Shovkoplyas*

The method for single event effect rate calculation used in the practice of satellites hardness assurance to space environment is presented. We propose solutions allowing conduct single event effect rate calculation with consideration for real shielding distribution at the point of integral circuit placement inside a satellite. The results obtained through the method are compared with the ones calculated with the standard CREME-96 model.

УДК 629.78

В. В. Авдєєв

Дніпропетровський національний університет

Маневр обходу небезпечної зони супутником з рушійною установкою малої тяги радіального напрямку

Надійшла до редакції 02.06.06

Для одновиткового маневру ухилення отримано залежність відстані у прогнозованій момент часу між супутником на майже коловій орбіті та центром небезпечної зони від величини прискорення, яке створюється рушійною установкою.

Зростання тривалості експлуатації і обсягу задач супутників зумовлює необхідність оптимізації їхнього маневрування, яке може проводитися з метою підтримання орбіти, обходу небезпечних зон та зміни траси.

Дослідженю руху космічного апарату (КА) з рушійною установкою (РУ) малої тяги присвячені десятки робіт [1—5, 7, 8, 10]. Запропоновано багато математичних моделей та алгоритмів розрахунку маневру при різних варіантах постановки задачі та припущеннях щодо величини і напряму прискорення, створюваного РУ. У більшості робіт досліджується маневр корекції орбіти і приймається припущення, що для його виконання постійна за величиною сила тяги РУ направлена вздовж трансверсалі.

Радіальний напрям сили тяги РУ має переваги з огляду простоти його визначення на борту КА. Результати досліджень руху КА з малим постійним за величиною прискоренням цього напряму найповніше описані в роботі [9]. Вони отримані з використанням припущень про центральне гравітаційне поле, відсутність аеродинамічного опору та інших збурень. Математична модель спрощується до системи двох нелінійних диференційних рівнянь першого порядку, для якої визначено перший інтеграл, що встановлює за-

лежність у вигляді нескладного кінцевого співвідношення між радіусом орбіти та радіальною складовою швидкості. Для широкого діапазону значень радіального прискорення з використанням відомого методу фазової площини визначено можливі види станів рівноваги та їхні властивості. Встановлена залежність між поточним ексцентриситетом орбіти, її радіусом, аргументом перицентра і величиною прискорення. Наведені приклади маневрів підтримання в заданому діапазоні середнього радіуса орбіти та зміни ексцентриситету.

Зростання рівня засмічення навколоземного простору і тривалості активного існування КА дає підстави передбачати можливу необхідність його маневрування з метою уникнути зіткнення з іншим космічним об'єктом (КО).

В роботі ставиться задача встановлення залежності відстані між КА і розташованим в певний момент часу на майже коловій орбіті (ексцентриситетом $e \leq 0.05$) центром небезпечної зони, визначеної прогнозом руху КО, від величини малого постійного прискорення радіального напряму, що створюється РУ при проведенні одновиткового маневру ухилення.

Якщо шляхом аналізу поточної космічної обстановки встановлюється можливість появи зо-

ни, небезпечної зіткненням із КО через інтервал часу t_d , не менший від періоду обертання T , то одним із шляхів її обходу може бути маневр ухилення, в результаті якого відстань l між КА і центром зони у момент часу t_d , який визначено прогнозом її появи, забезпечувала б зниження ймовірності зіткнення до заданого значення. Як відомо, при русі КА у центральному полі прискорення S радіального напрямку, що створюється РУ малої тяги протягом одного витка, змінює величину T за рахунок приросту довжини великої півосі орбіти і підсумкового прискорення, що діє на КА. Переваги включення РУ на один виток у тому, що після закінчення такого маневру, як показують результати моделювання при різних вхідних даних, мають місце найменші зміни форми орбіти і напряму осі апсид.

Якщо прогнозоване положення центра небезпечної зони визначається істинною аномалією θ , то для проведення маневру обходу зони РУ створює радіальне прискорення S в інтервалі часу від $t_d - T$ до t_d . Наближена аналітична оцінка відстані l між КА і центром зони в момент часу t_d в результаті такого маневру може бути визначена з використанням співвідношення

$$l(\bar{S}, e, \theta) = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \cdot (1 + e \cos \theta) \Delta T(\bar{S}, e, \theta), \quad (1)$$

де \bar{S} — безрозмірне прискорення, яке створюється РУ ($\bar{S} = S \cdot p^2 / \mu$), μ — гравітаційна стала, p — фокальний параметр орбіти, ΔT — приріст періоду обертання на витку маневру.

Середнє підсумкове значення радіального прискорення для майже колових орбіт, очевидно, дорівнює $\mu(1 - \bar{S})/p^2$, тоді

$$\Delta T(\bar{S}, e, \theta) = 2\pi \left[\sqrt{\frac{a^3(\bar{S}, e, \theta)}{\mu(1 - \bar{S})}} - \sqrt{\frac{a_0^3}{\mu}} \right], \quad (2)$$

де a — довжина великої півосі орбіти на витку маневру, $a_0 = p/(1 - e^2)$.

Для знаходження $a(\bar{S}, e, \theta)$, що входить до виразу (2), використаємо диференційні рівняння руху КА при дії малого ($\bar{S} \leq 0.05$) постійного радіального прискорення [9]. Для майже колових орбіт за базову величину зручно прийняти фокальний параметр p , тоді рівняння спрощуються:

$$\frac{dw}{du} = -\bar{V}_r, \quad \frac{d\bar{V}_r}{du} = \frac{\bar{S}}{w^2} - 1 + w, \quad (3)$$

де $w = p/r$, $\bar{V}_r = V_r \sqrt{p/\mu}$, r — поточний радіус орбіти, V_r — радіальна складова швидкості КА, u — аргумент широти.

Особливість рівнянь (3) в тому, що один їхній інтеграл можна записати у вигляді кінцевого співвідношення між змінними w та \bar{V}_r [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{V}_r^2}{2} - \frac{\bar{S}}{w} - w + \frac{w^2}{2} = \\ = \frac{\bar{V}_{r0}^2}{2} - \frac{\bar{S}}{w_0} - w_0 + \frac{w_0^2}{2} = A = \text{const}, \end{aligned} \quad (4)$$

де w_0 , \bar{V}_{r0} — величини на початку маневру. Спираючись на рівняння (3), (4), можна скласти рівняння для визначення екстремальних значень радіуса орбіти і, як наслідок, залежності $a(\bar{S}, e, \theta)$, що входить до виразу (2):

$$F(w) = w^3 - 2w^2 - 2A \cdot w - 2\bar{S} = 0, \quad (5)$$

де

$$A(\bar{S}, e, \theta) = - \left(\frac{\bar{S}}{1 + e \cos \theta} + \frac{1 - e^2}{2} \right).$$

Коли $\bar{S} = 0$ (РУ вимкнена), корені рівняння (5) дорівнюють 0 , $1 - e$ та $1 + e$. Нульовий корінь у даній задачі не має фізичного смыслу, решта коренів w_1 та w_2 визначає радіуси апогею та перигею незбуреної орбіти (3).

При проведенні одновиткового маневру з використанням РУ малої тяги ($|\bar{S}| \leq 0.05$) корені w_1 та w_2 будуть розташовані в околі $1 \pm e$ і визначатимуть довжину великої півосі орбіти на витку маневру:

$$a(\bar{S}, e, \theta) = p \left(\frac{1}{w_1(\bar{S}, e, \theta)} + \frac{1}{w_2(\bar{S}, e, \theta)} \right) / 2. \quad (6)$$

Для випадку, коли маневр розпочинається у перигеї ($\theta = 0$), легко переконатися, що корінь w_2 не залежить від \bar{S} і дорівнює $1 + e$, при цьому $w_1(\bar{S}, e)$ визначається шляхом розв'язування квадратного рівняння. Коли маневр розпочинається в апогеї ($\theta = \pi$), то від \bar{S} не залежить корінь w_1 , який дорівнює $1 - e$, а $w_2(\bar{S}, e)$ визначається аналогічно.

Якщо маневр розпочинається при довільному значенні істинної аномалії θ , то рівняння (5) може бути розв'язане тільки чисельним шляхом.

Один з коренів з похибкою порядку e^2 можна прийняти у вигляді

$$w_k(e, \theta) = 1 + e \cos \theta. \quad (7)$$

В цьому можна переконатися шляхом ділення полінома $F(w)$ на $w - w_k$, після чого елементарні операції дають інший корінь, що має фізичний смисл:

$$w_n = (z + \sqrt{z^2 - 8\bar{S}/w_k})/2, \quad (8)$$

де $z = 1 - e \cos \theta$. Індекси k, n у виразах (7), (8) приймають значення 1 або 2. Згідно з виразами (6)–(8), необхідна для розрахунку відстані l між КА і центром небезпечної зони в прогнозованій момент часу (1), (2) велика піввісь орбіти на витку маневру дорівнює

$$a(\bar{S}, e, \theta) \approx a_0 z(e, \theta) \left[\frac{w_k(e, \theta)}{z(e, \theta) + \sqrt{z^2(e, \theta) - 8\bar{S}/w_k(e, \theta)} + 0.5} \right]. \quad (9)$$

В інтервалах $e = 0 \dots 0.1$, $|\bar{S}| \leq 0.5$, $\theta = 0 \dots 180^\circ$ відхилення виразу (9) від величини, отриманої шляхом чисельного визначення коренів w_1, w_2 , не перевищує 1 %.

Похибка оцінки (1) із врахуванням (2), (9) визначалася шляхом інтегрування системи (3), яка не враховує збурень, і розширеної системи рівнянь руху КА, яка бере до уваги відхилення фігури Землі від сфери і її гравітаційного поля від центрального, а також опір атмосфери [7]. Середня відносна похибка розрахунку відстані $l(S, e, \theta)$ на значеннях істинної аномалії θ в межах $0 \dots 270^\circ$, висоти перигею $600 \dots 2000$ км, ексцентриситету незбуреної орбіти $e = 0.002 \dots 0.1$ і $|\bar{S}| = 0.05$, коли похибка максимальна, становить близько 9 %, найбільша похибка (при $\theta = 90^\circ$) не перевищує 30 %.

Проведений аналіз і моделювання показують, що ефективність вибраного маневру, яку можна кількісно оцінювати відношенням l/\bar{S} , вища при позитивних значеннях \bar{S} (рис. 1), але при цьому більше змінюються форма орбіти і напрямок осі апсид (рис. 2). Від значення істинної аномалії θ , коли починається маневр, його ефективність залежить несуттєво (рис. 3).

У багатьох випадках РУ малої тяги створюють прискорення $|\bar{S}| \leq 0.01$. При такому обмеженні з похибкою до 20 % із (1), (2), (9) можна

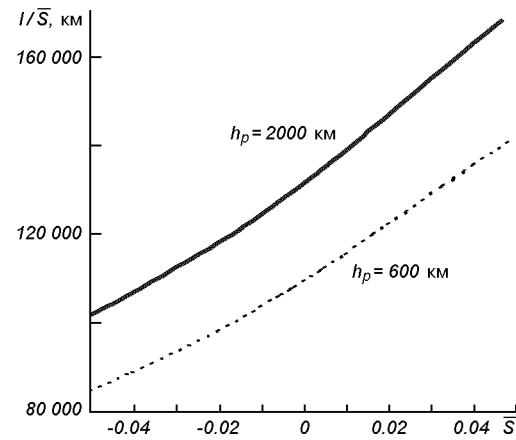


Рис. 1. Відносна відстань між КА і небезпечною точкою орбіти в залежності від безрозмірного радіального прискорення (h_p — висота перигею)

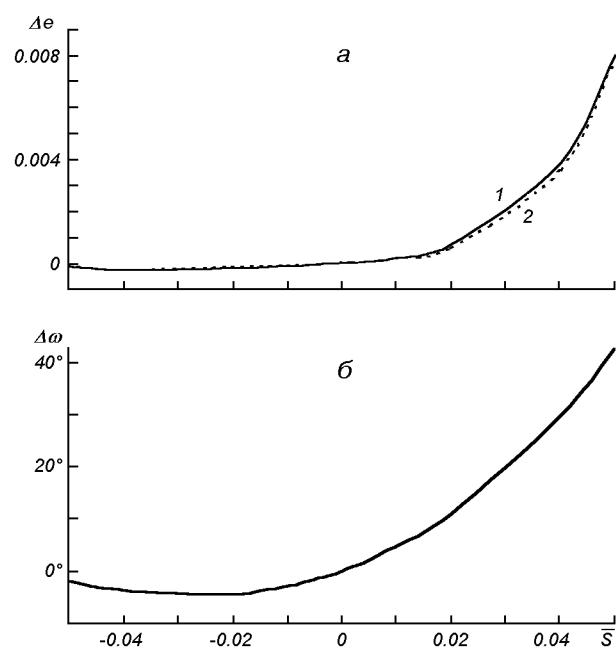


Рис. 2. Приріст ексцентриситету орбіти (а) для $\theta = 0$, $h_p = 600$ км (1), $h_p = 2000$ км (2) та приріст аргументу перигею (б) для $h_p = 600 \dots 2000$ км в кінці маневру в залежності від величини радіального прискорення

отримати лінійну оцінку:

$$l(\bar{S}, e, \theta) = \frac{\pi a_0(e) w_k(e, \theta)}{\sqrt{1 - e^2}} \left(\frac{3}{z^2(e, \theta)} + 1 \right) \bar{S}. \quad (10)$$

Встановлені залежності (1), (2), (9), (10)

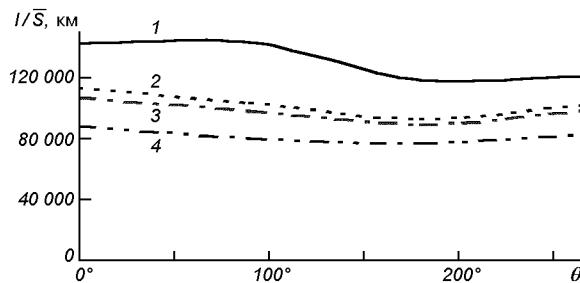


Рис. 3. Відносна відстань між КА і центром небезпечної зони в залежності від його істинної аномалії для значень $S = 0.05, 0.005, -0.005, -0.05$ (криві 1—4 відповідно)

відстані між КА і центром небезпечної зони, знаходження якого на орбіті КА в певний момент часу визначено прогнозом, від величини радіального прискорення, ексцентриситету незбуреної орбіти та істинної аномалії початку маневру можуть бути використані для прийняття рішення про спосіб маневрування з метою зменшення імовірності зіткнення з іншим космічним об'єктом.

Як було зазначено, особливість маневру з радіальним напрямом малої постійної тяги полягає у тому, що фокальний параметр залишається постійним, і форма орбіти змінюється несуттєво. Аналогічний маневр з використанням трансверсального напрямку тяги, як показали модельні розрахунки із врахуванням основних збурень, приблизно вчетверо ефективніший. Тобто, енергетичні витрати на ухилення від небезпечної зони значно менші, але при цьому відносний приріст фокального параметра буде більшим у 50 разів, а приріст ексцентриситету — у 20 разів. Аргумент перицентра отримує зміни такого ж порядку, як і при радіальному напрямі тяги.

Подальші дослідження доцільно провадити у напрямку оптимізації маневру та ускладнення моделі утворення небезпечної зони.

1. Авдеев В. В., Курінний В. В. Корекція майже колової орбіти космічного апарату одноразовим включенням рушійної установки малої тяги // Вісник Дніпропетровського ун-ту «Ракетно-космічна техніка». — 2004. — Вип. 7.—С. 3—7.
2. Васильев В. В. Оптимальная коррекция эллиптической орбиты аппарата с малой тягой с учетом сопротивления атмосферы и нецентральности гравитационного поля Земли // Тр. XIV чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. — М.: ИИЕТ АН СССР, 1980.—110 с.
3. Васильев В. В. Оптимальное управление эллиптической орбитой спутника Земли с двигателем малой тяги // Космич. исслед.—1980.—18, вып. 5.—С. 707—714.
4. Васильев В. В., Салмин В. В. Многошаговые алгоритмы коррекции орбиты спутника Земли двигателем малой тяги // Космич. исслед.—1984.—22, вып. 4.—С. 507—519.
5. Гродзowski Г. Л., Иванов Ю. Н., Токарев В. В. Механика космического полета (проблемы оптимизации). — М.: Наука, 1975.—704 с.
6. Ильин В. А., Кузмак Г. Е. Оптимальные перелеты космических аппаратов с двигателями большой тяги. — М.: Машиностроение, 1976.—744 с.
7. Основы теории полета и элементы проектирования искусственных спутников Земли / Под ред. М. К. Тихонравова. — М.: Машиностроение, 1974.—332 с.
8. Салмин В. В., Соколов В. О. Приближенный расчет маневров формирования орбиты спутника Земли с двигателем малой тяги // Космич. исслед.—1991.—29, вып. 6.—С. 872—888.
9. Титов Г. С., Иванов В. А., Горьков В. Л. Межорбитальные и локальные маневры космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.—245 с.
10. Юрин В. В. Оптимальная коррекция параметров орбиты космического аппарата с двигателем малої тяги // Космич. исслед.—1983.—21, вып. 5.—С. 666—674.

MANOEUVRE TO BYPASS A DANGEROUS ZONE BY A SATELLITE WITH THRUSTER OF LOW TRACTIVE FORCE AND RADIAL DIRECTION

V. V. Avdeev

For the single-turn evasive manoeuvre, we obtained the dependence of distance in a predictable time point between a satellite on a near-circle orbit and the centre of a dangerous zone on the value of radial acceleration created by the propulsion system.

УДК 621.396.969

А. Н. Загорулько¹, О. А. Моргун², В. І. Богом'я³

¹Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Євпаторія

²Рада Національної безпеки та оборони, Київ

³Київський оперативний центр Національного центру управління та випробувань космічних засобів, Київ

Аналіз можливості використання ефекту розсіювання для визначення космічного сміття

Надійшла до редакції 26.06.06

Проведено аналіз можливості використання ефекту релейського розсіювання для пошуку космічного сміття. Показано, що є реальна можливість визначення геометричних розмірів малих об'єктів космічного сміття.

Одним із факторів освоєння космічного простору є проблема засмічення навколоzemного космічного простору продуктами техногенного характеру (космічне сміття). Основними причинами й джерелами засмічення космічного простору є: фрагментація об'єктів космічної техніки в результаті несанкціонованих вибухів і руйнувань; викидання у космічний простір операційних елементів (пружин, штовхачів, заглушок та ін.); викидання продуктів роботи двигунів, незгорілого твердого палива; ступені ракет-носіїв, розгінних блоків і КА, що закінчили своє активне функціонування; руйнування космічних об'єктів внаслідок їхніх зіткнень на орбіті один з одним або із частками космічного сміття; ерозія матеріалів з поверхні КА й засобів виведення; тросові системи, що відділяються від КА після використання; викидання в космічний простір засобів забезпечення життєдіяльності пілотованих КА й орбітальних станцій та ін.

Проблема засмічення навколоzemного космічного простору гостро порушує питання про ризик завдання пошкоджень функціонуючим космічним апаратам та засобам їхнього виведення. Частки, щільність яких відповідає щільності кам'яних або залізних метеоритів, при швидкостях 50—70 км/с здатні пробивати металеву оболон-

ку товщиною 8—20 діаметрів частки. Так, частинка діаметром 0.1 мм здатна пробити металеву оболонку товщиною 0.8—2 мм. Небезпечними прийнято вважати частки з розмірами більше 1 мм, здатними виводити з ладу життєво важливі системи космічних апаратів та ракет-носіїв. Частки меншого розміру можуть наносити ушкодження, що призводять до погіршення характеристик окремих систем і вузлів космічних апаратів [2, 3].

За даними російських експертів зараз спостерігається значна динаміка збільшення кількості космічних об'єктів на навколоzemній орбіті (табл. 1) [1].

Космічні об'єкти штучного походження, менші ніж 20 см, не враховуються в каталогах, однак їхня кількість перевищує кілька десятків тисяч [2].

Таблиця 1. Кількість космічних об'єктів на навколоzemній орбіті

Роки	Об'єктів	КА	З них діючих КА
1992	6758	1948	497
1999	8089	2370	668
2004	8944	2830	937

Керування польотами космічних апаратів різного типу й призначення, планування роботи всіх служб і засобів наземного автоматизованого комплексу управління здійснюється на основі врахування космічної обстановки, що безупинно змінюється. Під терміном «космічна обстановка» прийнято розуміти сукупність всіх космічних об'єктів, факторів і умов космічного простору, які можуть вплинути на підготовку, хід і результат функціонування космічних апаратів (КА) [1—3].

Можливості сучасних засобів контролю космічної обстановки (як оптичних, так і радіотехнічних) обмежені значеннями розмірів фрагментів від 10 см на низьких висотах до 1 м на геостаціонарних орбітах. Крім того, застосування оптичних засобів, незважаючи на вищі показники, обмежене як часом доби, так і погодними умовами.

Радіотехнічні методи вільні від недоліків оптичних методів. Використовуючи когерентне випромінювання, вони додатково дозволяють вимірювати радіальну швидкість і похилу дальність.

Успішне функціонування радіотехнічного комплексу пов'язане з наявністю деякої априорної інформації про космічний об'єкт. Оскільки антенні системи радіотехнічного комплексу внаслідок необхідності прийому слабких сигналів мають вузьку діаграму спрямованості, потрібно забезпечити розрахунок і одержання достатньо точних цілевказівок космічного об'єкта за кутами і допплерівськими частотами. Отже, початок застосування радіотехнічного комплексу для контролю космічної обстановки обмежується часом, що пройшов до грубої «прив'язки» орбіти космічного об'єкта. Тільки після цього можна застосувати радіотехнічний комплекс у завданнях супроводу.

Друге обмеження застосування радіотехнічного комплексу для контролю космічної обстановки визначається високими кутовими швидкостями низькоорбітальних об'єктів. Радіотехнічні комплекси, призначенні для керування низькоорбітальними космічними апаратами, мають порівняно невеликі (2-4 м) малоінерційні антенні системи, однак коефіцієнти підсилення таких антен невеликі, й РТК близького космосу не можуть приймати слабкі сигнали [5].

Навпаки, радіотехнічні комплекси, призначенні для управління космічними апаратами далекого

космосу, мають дзеркальні антени значних розмірів (до 70 м). Коефіцієнт підсилення таких антен досягає 70 дБ. Антенна система в сукупності з малошумними вхідними підсилювачами прийомного пристрою дає можливість приймати слабкі сигнали від досить віддалених космічних об'єктів. Однак більша інерційність антенних систем радіотехнічних комплексів далекого космосу дозволяє застосовувати їх для контролю низькоорбітальних об'єктів тільки на витках з невеликим (до 35°) кутом місця щодо пункту установки антени.

Незважаючи на зазначені обмеження, потенційні можливості радіотехнічних комплексів дають всі підстави для їхнього застосування у комплексах контролю космічної обстановки для визначення космічного сміття.

Виміри дальності, радіальної швидкості та радіального прискорення, одержані радіотехнічними методами, достатні для визначення параметрів руху космічних об'єктів та їхньої каталогізації.

Характеристики радіотехнічних комплексів, що використовуються як радіолокатори, визначаються ефективною відбивною поверхнею. Під «ефективною відбивною поверхнею» розуміють поверхню, розміщену на тій же відстані, що й об'єкт, перпендикулярно до напрямку випромінювання, яка створює в радіолокаційній системі ту ж щільність потоку відбитої енергії, що й реальний об'єкт [6].

Ефективну відбивну поверхню можна розрахувати лише для об'єктів найпростішої форми, де вона дорівнює площі поперечного перерізу. Для металевої сфери радіусом $r \gg \lambda$ ефективна відбивна поверхня дорівнює

$$\sigma = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2, \quad (1)$$

і не залежить від довжини хвилі. У цьому випадку всі розрахунки проводяться за рівняннями радіолокації [5, 6].

Для космічних об'єктів, поперечний переріз яких багато менший за довжину хвилі, та при досить високому енергетичному потенціалі в радіолокаційних системах спостерігається ефект релейського розсіювання.

Релейське розсіювання характерне для часток, малих порівняно з довжиною хвилі випромінювання. При цьому ефективна відбивна

поверхня прямо пропорційна поперечнику у шостому степені [7]:

$$\sigma = 9 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^4 \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2. \quad (2)$$

Застосування ефекту розсіювання Релея для завдань дослідження космічного сміття радіолокаційними методами дозволяє значно розширити діапазон космічних об'єктів, що досліджуються і супроводжуються. Для цієї мети найвідповіднішим за технічними характеристиками (випромінюваній потужності, ефективній площині коефіцієнтами підсилення антен) є радіотехнічний комплекс, призначений для керування космічними апаратами далекого космосу.

Велика інерційність антенних систем радіотехнічного комплексу далекого космосу не дозволяє здійснювати супровід низькоорбітальних космічних об'єктів через їхні порівняно високі кутові швидкості, тому для них використовуються вимірювання проходження часток через нерухомий антеннний промінь із вузькою діаграмою спрямованості.

За даними радіолокаційного спостереження космічних часток (м. Голдстоун, США) за 21.4 год виявлено 875 об'єктів з еквівалентними розмірами від 2 до 18 мм у діапазоні висот від 177 до 1662 км [7, 8]. Національні антенні системи (табл. 2) мають аналогічні технічні характеристики, тому можна очікувати аналогічних результатів при їхньому практичному застосуванні (від декількох міліметрів на низькій орбіті до декількох сантиметрів на геосинхронній) [7].

Таблиця 2. Технічні характеристики національних антенних засобів

Антенні засоби	Діапазон	Ефективна площа, м ²
АДУ-1000	ДМ сполучений	900
	ДМ	650
	СМ	450
РТ-32	ДМ	422
	СМ	407
РТ-70	18 см	2450
	6 см	2800
	5 см	2750
	3.55 см	2450
	1.35 см	1700
	0.82 см	850

Одержання координатної інформації не дає відповіді на питання про реальні розміри об'єкта та яку реальну небезпеку він несе — для цього необхідно враховувати інформацію про геометричні характеристики космічного об'єкта.

Ефективна відбивна поверхня є важливою характеристикою космічного об'єкта, що залежить від геометричних розмірів d та довжини хвилі λ , але не залежить від потужності випромінювання [9]:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2}, \quad (3)$$

де Π_1, E_1 — щільність потоку потужності у точці об'єкта та напруженість поля падаючої хвилі, Π_2, E_2 — щільність потоку потужності у точці прийому та напруженість поля відбитої хвилі, R — відстань між радіотехнічною системою та об'єктом.

Вимоги до необхідної потужності випромінювання визначаються відношенням сигнал/шум на вході прийомного пристроя радіотехнічного комплексу, чутливістю приймальних пристрій радіотехнічного комплексу [4]

$$P_{\text{прем-мин}} = \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{min}},$$

де $P_{\text{ш}} = kT_{\text{еф}}\Delta F$, k — постійна Больцмана, $T_{\text{еф}}$ — шумова температура приймальної системи, ΔF — ширина смуги пропускання приймача на високих частотах (до детектора). Із залежності ефективної відбивної поверхні від довжини хвилі (при фіксованих геометричних розмірах) можна визначити геометричні розміри малих об'єктів космічного сміття.

Для цього космічний об'єкт опромінюється хвилями кількох фіксованих частот, і за зміною ефективної відбивної поверхні з довжиною хвилі визначаються геометричні розміри об'єкта.

Наприклад, позначимо у формулі (2) коефіцієнт збільшення ефективної відбивної поверхні за рахунок релейського розсіювання як

$$k_r = 9 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^4 = 9\pi^4 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^4. \quad (4)$$

Очевидно, що він починає впливати в діапазоні розмірів космічних об'єктів $d = (0.2...0.9)\lambda$. При зміні довжини хвилі у два рази коефіцієнт збільшення ефективної відбивної поверхні k_r зміниться у $2^4 = 16$ разів.

У випадку, коли при різних довжинах хвиль значення ефективної відбивної поверхні приблизно однакові, ця ефективна поверхня приблизно дорівнює площі поперечного перерізу космічного об'єкта.

Запропоновані вище підходи до одержання інформації про геометричні характеристики космічних об'єктів дозволяють більш вірогідно оцінити небезпеку досліджуваних об'єктів для функціонуючих космічних апаратів й засобів їхнього виведення, більш впевнено визначати й прогнозувати параметри руху, каталогізувати й супроводжувати об'єкти космічного сміття малих розмірів.

1. Агаджанов П. А., Горшков Б. М., Смирнов Г. Д. Основы радиотелеметрии. — М.: Воениздат, 1971.— 248 с.
2. Застосування космічних систем для забезпечення дій збройних сил: Навчальний посібник / Під ред. В. І. Ткаченка. — Харків: ХВУ, 2001.—192 с.
3. Машков О. А., Фролов В. М. Проблема космічного тероризму: концептуальні основи захисту // Нерозповсюдження та контроль озброєнь.—2002.—№ 1 (13).—С. 9—14.
4. Мельник Ю. А., Стогов Г. В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. — М.: Сов. радио,

- 1973.—368 с.
5. Моделирование в радиолокации / Под ред. А. И. Леонова. — М.: Сов. радио, 1979.—264 с.
 6. Немец А. А. Федоров В. И. Основы радиолокации и телевидения: Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1971.— 352 с.
 7. Справочное пособие по космической тематике / Состав. А. Т. Стрельников. — М.: МО СССР, 1989.—212 с.
 8. Goldstein R. M., Goldstein S. J. Jr. Flux of millimetric space debris // Astron. J.—1995.—110,.—P. 1392—1396.
 9. Rjiga J. N., Zaitsev A. I. Possibility to study space debris by the radar-space-complex in Evpatoria. — Moscow: Institute of Radiotechnic and Electronics of the Russian Ac. Sc., 1998.—P. 116—127.

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF THE USE OF THE DISPERSION EFFECT FOR DETERMINATION OF SPACE DEBRIS

A. Zagorulko, A. Morgun, V. Bogomia

An analysis of possibility of the use of effect of dispersion is conducted, namely, the Rayleigh dispersion for determination of space debris. It is found that starting from the dependence of effective surface reflecting in the region of the Rayleigh dispersion on a wavelength, there is a real possibility to determine geometrical sizes of small objects of space debris.

581.133.1:535.361.2

В. А. Яценко¹, С. М. Кочубей², П. А. Хандрига³,
В. В. Донец⁴, О. В. Семенив¹

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, Київ

²Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

³Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ

⁴Казенне підприємство Центральне конструкторське бюро «Арсенал», Київ

Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация

Надійшла до редакції 26.10.06

Розглянуто проблему дистанційного оцінювання вмісту хлорофілу у рослинності за спектром відбивання для моніторингу її стану. Пропонується метод рішення проблеми на основі головних компонентів і нелінійних моделей регресії. Розроблено програмно-апаратний комплекс, що не вимагає обчислення похідних.

ВСТУПЛЕНИЕ

Проблема риска в связи с постоянно ухудшающейся экологической обстановкой является одной из основных в программе обеспечения безопасности существования человеческого общества. В ее решении важную роль играют системы мониторинга различных компонентов окружающей среды с целью наблюдения эволюции деградационных процессов в природе, а также обнаружения эксцессов в связи аварийными ситуациями техногенного происхождения или природными аномалиями. К числу задач мониторинга можно отнести следующие: а) выявление и прогнозирование эволюции состояния различных участков суши; б) раннее обнаружение экологических стрессов; в) контроль состояния техногенных объектов повышенной опасности и г) контроль хозяйственных социально важных объектов, например сельскохозяйственных угодий и лесов. Для решения таких задач наиболее приемлемы дистанционные наблюдения, что требует разработки новых методов получения

необходимой информации. Для этого нужно найти удобные для дистанционных измерений параметры объектов и способы тематической дешифровки результатов измерений. Растения являются необходимым компонентом среды обитания живого мира, а фотосинтетический аппарат зеленых листьев может быть использован как чувствительный индикатор стрессовых ситуаций. Последнее обусловлено тем, что стрессы различного происхождения влияют, прежде всего на содержание хлорофилла в листьях, а этот параметр может быть измерен бесконтактным дистанционным методом, основанном на использовании отражательных характеристик листьев в оптическом диапазоне. Имеется большое количество публикаций, указывающих на реакцию пигментного аппарата растений в ответ на действие стресса. Известны работы, указывающие на снижение хлорофилла в растительности Чернобыльской зоны [12], при утечках газа на магистральных газопроводах [20], вирусных заболеваниях [18], дефиците азотного питания [5, 15, 16] и влаги [8—10, 19].

Проблема информативности параметров спектра отражения растительности относительно различных показателей ее состояния активно разрабатывается в течение последних 30 лет. Работы более раннего периода были ориентированы на построение различных вегетационных индексов, использующих спектральные коэффициенты яркости, которые измеряли многоканальными дистанционными спектрорадиометрами. Полуширина спектрального участка таких каналов составляла 10–30 нм. Были найдены комбинации этих коэффициентов, которые обнаруживали высокую степень корреляции с содержанием в листьях тех или иных биохимических компонентов, в частности хлорофилла. Дистанционные измерения с использованием такого подхода называют мультиспектральными, а соответствующая аппаратура — это многозональные сканеры. Результаты таких измерений имеют существенное ограничение относительно дешифровки данных с целью получения корректной информации. Это обусловлено в основном двумя обстоятельствами: 1) необходимостью иметь эталоны коэффициентов яркости, которые необходимо измерять в тех же условиях, что и исследуемый объект и 2) искажение полезного сигнала отражения растительности вкладом отражения от почвы при работе с фитоценозами с неполным проективным покрытием.

В последнее время широкое развитие получили исследования, касающиеся информативных возможностей спектральных кривых отражения растительности, измеренных при высоком спектральном разрешении. Установлено, что изменения наклона линейного участка спектральной кривой в области так называемого красного края ($\lambda = 680$ – 800 нм) обусловлены вариациями содержания хлорофилла [13, 17]. В некоторых работах последних лет для качественной оценки изменений концентрации хлорофилла использовали отношение интенсивности двух экстремумов в графике первой производной спектральной кривой в области красного края. В работе [15] показано, что при более низкой концентрации хлорофилла доминирует коротковолновый экстремум. В работах [22, 23] предлагается отношение D705/D722 интенсивностей экстремумов при $\lambda = 705$ и 722 нм в качестве дифференциального индекса для распознавания ситуаций, соответствующих большему или меньшему со-

держанию хлорофилла, и выявления таким образом стресса у оливковых деревьев. Авторы, однако, считают, что величину этого отношения дает вклад флуоресценция листьев.

Нами в течение ряда лет разрабатывается методологический подход для определения хлорофилла в листьях на основе корреляционной связи этого параметра с величиной отношения двух экстремумов в графике первой производной [1, 3–5, 14, 21]. Было показано, что такой подход позволяет получить уравнение регрессии для расчета хлорофилла [14] и что эта формула устойчива в отношении вкладов отражения от почвы [3]. Однако работоспособность метода существенно зависит от уровня шума на выходе измерительной установки, поскольку этот фактор определяет возможность различия двух экстремумов первой производной. Кроме того, для приборной реализации метода необходимо разработать способ автоматического поиска положения экстремумов и их интенсивности.

Указанные недостатки предложенного подхода стимулировали поиск альтернативных методов определения хлорофилла с использованием спектральной кривой отражения. Анализ методов позволил предложить и обосновать новый подход на основе отыскания главных компонентов. Основные принципы этого метода будут изложены ниже.

Для проверки применимости разработанных нами методов, адаптации их к полевым измерениям и внедрения в широкую практику необходим полевой прибор для измерения спектров отражения растительности. Он должен отвечать ряду специфических требований, обуславливающих его конструктивные особенности, а также включать специализированное программное обеспечение для расчетов хлорофилла по разработанным алгоритмам.

МЕТОДОЛОГИЯ

Спектральные измерения. Для работы по методу главных компонентов использовали спектры отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла. Их записывали в цифровом виде на спектрофотометре СФ-10, снабженном интегрирующей сферой. Регистрирующая система была модифицирована с тем,

чтобы получать спектры в цифровом виде. Диапазон регистрации 400—750 нм, шаг отбора информации 1 нм. Кусочки листьев, спектры отражения которых были записаны, затем подвергали обработке 80 % ацетоном для экстракции хлорофилла, содержание которого в экстракте определяли спектрофотометрически по Арнону [7].

Системы растительность — почва, используемые для выяснения устойчивости алгоритмов оценки хлорофилла к влиянию вклада отражения от почвы при неполном проективном покрытии, имитировали в виде физических и графических моделей. Первые осуществляли путем покрытия листьями только определенной части поверхности измерительной кюветы. Фоном служила черная почва или песок, как подложки с минимальным и максимальным отражением. В графических моделях неполное проективное покрытие моделировали математическим сложением спектральных кривых отражения листьев и фона с заданными весовыми коэффициентами.

ОЦЕНИВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Под спектральной кривой будем понимать зависимость коэффициента яркости q от длины волны λ . Представим спектральную кривую в виде вектора $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_M)$, где M — количество его компонентов. Когда мы имеем дело с множеством измерений, значения вектора \mathbf{q} изменяются в соответствии с изменением временного параметра t . Требуется получить более простое описание семейства векторов. Прежде всего сдвинем начало системы координат в «центр тяжести», определяемый по формуле

$$\bar{\mathbf{q}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{q}^l, \quad l=1, \dots, L,$$

где L — число спектральных кривых, или по формуле

$$\bar{q}_j = \frac{1}{T} \int_0^T q_j(t) dt, \quad j=1, \dots, M,$$

если рассматривать спектральные кривые как непрерывные функции по времени.

Чтобы произвести сдвиг начала координат в центр тяжести, введем новую переменную \mathbf{h} :

$$\mathbf{h}(t) = \frac{\mathbf{q}(t) - \bar{\mathbf{q}}(t)}{\bar{N}},$$

где \bar{N} — нормировочная постоянная, введенная для того, чтобы вектор \mathbf{h} имел единичную длину. Это достигается требованием

$$\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{h}(t)^2 dt = 1.$$

Для решения задачи необходимо построить наиболее простое и эффективное приближение зависящего от времени вектора \mathbf{h} .

Введя обозначение

$$R_{jk} = \frac{1}{T} \int_0^T h_j(t) h_k(t) dt,$$

мы можем получить выражение

$$\sum_{l=1}^M R_{jl} v_l^{(k)} = \lambda_k v_j^{(k)}, \quad j=1, \dots, M,$$

где $\mathbf{v}^{(k)}$ — k -й собственный вектор.

Введем корреляционную матрицу \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = [R_{jk}] = \langle q_j q_k \rangle, \quad (1)$$

которая позволяет записать для вектора \mathbf{h} следующее выражение [21]:

$$\mathbf{R} \mathbf{v}^{(k)} = \lambda_k \mathbf{v}^{(k)}.$$

Так как \mathbf{R} — действительная симметричная матрица, она обладает действительными собственными значениями

$$\lambda_k \geq 0.$$

Можно показать, что

$$\sum_{k=1}^M \lambda_k = 1.$$

Заметим, что описанный выше вектор \mathbf{h} можно представить в виде

$$\mathbf{h}(t) = \sum_{k=1}^M \xi_k(t) \mathbf{v}^{(k)}, \quad (2)$$

Амплитуды $\xi_k(t)$ можно найти, зная векторы \mathbf{h} и $\mathbf{v}^{(k)}$, из соотношения

$$\xi_k(t) = \mathbf{v}^{(k)} \mathbf{h}(t) = \sum_{j=1}^M v_j^{(k)} h_j(t). \quad (3)$$

Корреляция между ξ_k и ξ_l описывается соотношением

$$\frac{1}{T} \int_0^T \xi_k(t) \xi_k(t) dt = \lambda_k \delta_{kk}, \quad (4)$$

где δ_{kk} — дельта-символ Кронекера.

Вычислим величину ошибки, которую мы совершим, учитывая меньшее число членов K при максимальном числе членов M . Средняя ошибка, которая определяется квадратом разности между вектором \mathbf{h} и его приближенным разложением, вычисляется по формуле

$$E_k = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\mathbf{h}(t) - \sum_{k=1}^K \xi_k(t) \mathbf{v}^{(k)} \right)^2 dt, \quad (5)$$

$$K \leq M.$$

Можно показать, что

$$E_k = 1 - \sum_{k=1}^K \lambda_k. \quad (6)$$

Если упорядочить собственные векторы в порядке убывания их собственных значений, можно видеть, что быстрее всего ошибку можно минимизировать, если первыми включить в выражения (6) или (5) наибольшие собственные значения. Таким образом, определив собственные значения, мы получаем возможность оценить качество нашего приближения. Для анализа спектральных кривых можно ограничиться первыми членами разложения (3).

Для вычисления концентрации хлорофилла Z используем первые K членов разложения, на основе которых по текущим обучающим спектральным кривым строим регрессионное уравнение. Предложено бикубическое регрессионное уравнение

$$Z(x, y) = a + b\xi_1 + c\xi_2 + d\xi_1\xi_2 + d_1\xi_1\xi_2^2 + d_2\xi_1^2\xi_2 + e_1\xi_1^2 + e_2\xi_2^2 + f_1\xi_1^2 + f_2\xi_2^2,$$

где ξ_1 и ξ_2 — первый и второй главные компоненты; $a, b, c, d, d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2$ — параметры, определяемые с помощью соответствующей оптимизационной процедуры.

Описанный выше метод был использован для разработки численного алгоритма определения концентрации хлорофилла. Все формулы записывались в дискретной форме. Программная реализация была выполнена на языке C++ с использованием математической библиотеки, по-

ставляемой с пакетом Matlab. Для проведения экспериментов использовались спектральные кривые отражения листьев озимой пшеницы. Главные компоненты определяются на основе описанного выше метода с использованием набора спектральных кривых без предварительной фильтрации шумов. Содержание хлорофилла вычислялось на основе регрессионных моделей (линейной, полиномиальной, билинейной и бикубической) [21].

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Для определения концентрации хлорофилла методом главных компонентов (МГК) были взяты спектральные кривые отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла, концентрация которого была установлена химическим методом. Три из них приведены на рис. 1. Главные компоненты (ГК) определялись по корреляционной матрице R для диапазона $\lambda = 640...745$ нм. Рис. 2 демонстрирует зависимость первой главной составной от содержания хлорофилла.

Рис. 3 демонстрирует зависимость величины средней ошибки E (5) от числа главных компонент, используемых для вычисления концентрации хлорофилла. Из графика видно, что при использовании пяти собственных векторов средняя ошибка E близка к нулю. При построении

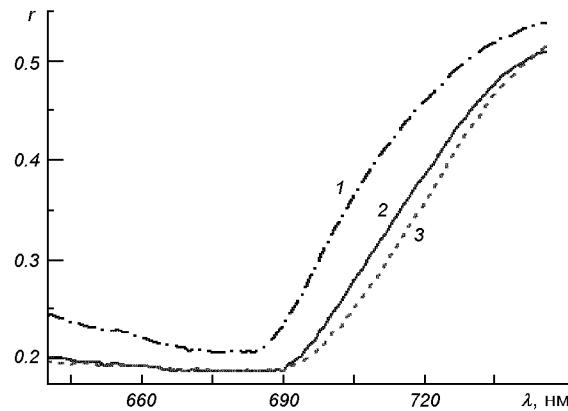


Рис. 1. Спектральные кривые озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла. Здесь $r = I_o/I_p$ — коэффициент отражения (безразмерная величина), I_o — интенсивность отраженного света, I_p — интенсивность падающего света

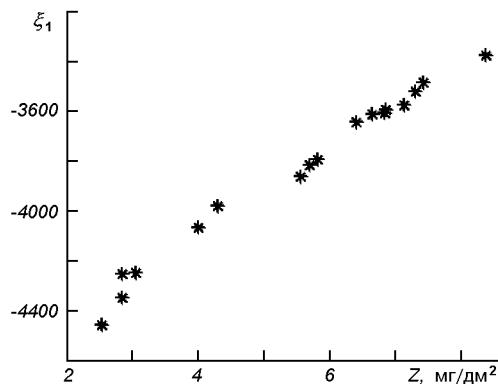


Рис. 2. График зависимости значения первой главной компоненты от концентрации хлорофилла

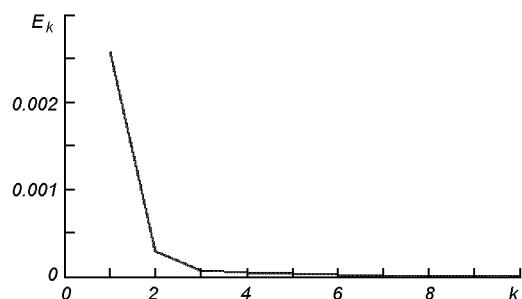


Рис. 3. Зависимость величины ошибки от числа собственных векторов

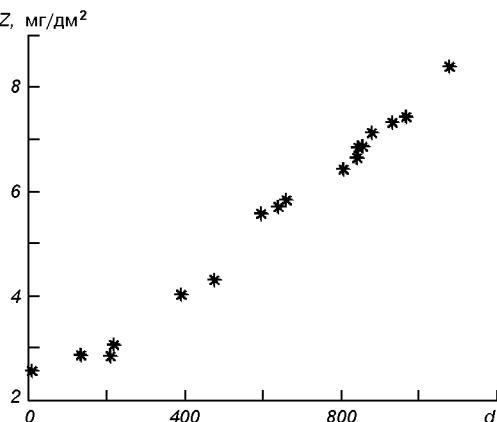


Рис. 4. Зависимости концентрации хлорофилла от эвклидова расстояния между векторами главных компонентов

одномерной регрессионной модели концентрации (линейной и полиномиальной) вычислялось эвклидово расстояние между векторами главных компонентов. В двумерных моделях регрессии

(билинейная и бикубическая) в качестве независимых переменных использовались первая и вторая главные компоненты корреляционной матрицы. Указанные модели были получены с использованием 17 обучающих кривых. На рис. 4 показана зависимость концентрации хлорофилла от эвклидова расстояния между векторами ГК, соответствующих обучающим кривым. Сумма квадратов ошибок (SSE) и средний квадрат ошибки (MSE) линейных регрессионных моделей, полученных по методу главных компонентов (МГК) и методу первой производной (МПП), представлены в табл. 1. Полученные значения концентрации хлорофилла для различных типов регрессии, а также с применением биохимического метода и МПП приведены в табл. 2.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ КРИВЫХ И ОЦЕНИВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

С целью анализа спектральных кривых и оценивания содержания хлорофилла в растительности было разработано прикладное программное обеспечение (ППО) WINCHL, которое состоит из следующих функционально связанных подсистем: подсистемы управления, базы данных, библиотеки алгоритмов и графического интерфейса для взаимодействия с пользователем. Структурная схема ППО WINCHL представлена на рис. 5.

Система WINCHL предназначена для получения спектральных данных со спектрометра; вычисление значения хлорофилла по одному из разработанных алгоритмов и сохранения результатов в базе данных.

ППО разработано для двух вариантов использования. Первый, USWHL, предназначен для экспресс-оценки хлорофилла в растительности в полевых условиях. В функции USWHL входит получение спектральных данных со спектрометра, вычисление концентрации хлорофилла и сохранение результатов в базе данных. Этот вариант ППО прост в использовании, он хорошо подходит для накопления спектральных кривых в базе данных и получения быстрых оценок содержания хлорофилла в растительности. Второй, WINCHL (рис. 6), предназначен для

Таблица 1. Ошибки регрессионных моделей

Бикубической		Билинейной		Линейной		Полиномиальной	
SSE	MSE	SSE	MSE	SSE	MSE	SSE	MSE
0.2779	0.0397	0.7376	0.0567	0.8547	0.0570	0.5754	0.0393

Таблица 2. Значения концентрации хлорофилла (различные типы регрессии)

Наименование кривой	Бикубическая	Билинейная	Линейная	Полиномиальная	Биохимический метод	Метод первой производной
RP62.dat	2.1418	2.1487	1.9854	2.2605	2.33	2.84
RP13.dat	2.8428	2.8929	3.1543	3.1628	2.90	3.20
RP50.dat	4.5774	4.7125	4.6984	4.5461	3.75	4.30
RP4.dat	4.6663	4.8861	4.7960	4.6409	4.76	4.95
RP40.dat	5.3740	5.5584	5.4719	5.3210	6.29	5.67
RP20.dat	5.8182	5.9891	5.8783	5.7500	6.57	6.02
RP19.dat	6.7840	6.6715	6.6551	6.6120	6.82	6.67
RP58.dat	7.1004	7.1326	6.9944	7.0058	7.65	7.45
RP35.dat	8.2049	7.8759	7.8213	8.0096	8.08	7.53
SSE =	2.4555	2.1792	2.7558	2.7965		1.7406



Рис. 5. Структурная схема прикладного программного обеспечения

Рис. 6. Графический интерфейс ППО WINCHL

Рис. 7. Общий вид прибора

исследовательских целей с широким набором инструментов для обработки спектральных кривых и исследования их информационных свойств. Библиотека алгоритмов содержит алгоритмы цифровой фильтрации и сглаживания, фурье-анализа, дифференцирования, оптимизации, определения ГК, множественной регрессии, метода, базирующегося на использовании параметров графика первой производной спектральной кривой отражения и перестраиваемого генератора шумов. Визуальный конструктор алгоритмов позволяет задать необходимую последовательность алгоритмов обработки спектральных кривых и их параметры по своему желанию и формировать различные алгоритмы вычисления хлорофилла.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Для реализации разработанного нами метода с применением главных компонентов, а также метода с использованием первой производной [5, 14] необходим полевой спектрометр с высоким спектральным разрешением (не хуже 1–2 нм). Второй из методов предъявляет высокие требования к уровню сигнал/шум. По нашим оценкам уровень шума не должен превышать 0.1 % от шкалы прибора. Оба эти требования — высокое спектральное разрешение и низкий уровень шума противоречат друг другу, поскольку первое из них требует сужения спектральной ширины входной щели прибора, что снижает интенсивность светового потока и, следовательно, способствует повышению относительной величины шумового сигнала. Эти условия должны сочетаться с большой величиной динамического диапазона, поскольку имеет место большой перепад значений коэффициента отражения в области красного края — от 3 до 60 % в диапазоне $\lambda = 680\ldots800$ нм. Кроме того, при работе в полевых условиях натуральная освещенность может изменяться от 10 000 лк в пасмурную погоду до 120 000 лк в солнечную. В наземных измерениях возникает также специфическое требование к форме поля зрения прибора. При использовании традиционной конструкции вход-

ного тракта, используемой в аэродистанционных или космических измерениях поле зрения превращается в узкую и длинную полоску с размерами несколько миллиметров в ширину и более 1 м в длину при работе с высоты 1.5 м.

Эти проблемы были разрешены с применением оригинальных конструкторских решений. Оптический блок является двухканальным спектрофотометром, который выполнен на базе полихроматора с плоской дифракционной решеткой, зеркальными сферическими объективами и ПЗС в качестве фотоприемного устройства (рис. 7). Канал визуализации поля зрения прибора позволяет выбирать необходимый для измерений участок фитоценоза. Запись полного информационного пакета — регистограммы и служебной информации — может осуществляться на флеш-карту или непосредственно в компьютер Notebook. Последний содержит разработанное нами программное обеспечение WINCHL, которое обеспечивает работу прибора в двух режимах — пользовательском и режиме для научных исследований. Пользовательский канал позволяет получать оценки хлорофилла в растительности в реальном масштабе времени. Режим для научных исследований производит запоминание спектральных кривых в базе данных вместе со служебной информацией, каковой являются данные о температуре и освещенности в момент измерения и географические координаты места проведения измерений. Эти данные поступают с соответствующих датчиков, которыми оснащен прибор. Наличие в нашем программном обеспечении библиотеки алгоритмов и ряда математических инструментов позволяет в дальнейшем осуществлять различные методы обработки спектров для разработки методических подходов для определения других важных параметров состояния растительности.

Лабораторные испытания оптического блока показали, что разработанная конструкция оптической схемы позволяет добиться разрешения 1.6 нм. Примененная система накопления сигнала на уровне приборной реализации позволяет существенно снизить шумы. Полевые испытания подтвердили заключение о низком уровне шумов. Сравнение единичной записи спектра отражения и усредненного из 10 повторных записей того же самого падающего в поле зрения прибора, показали, что их отличия не превышают

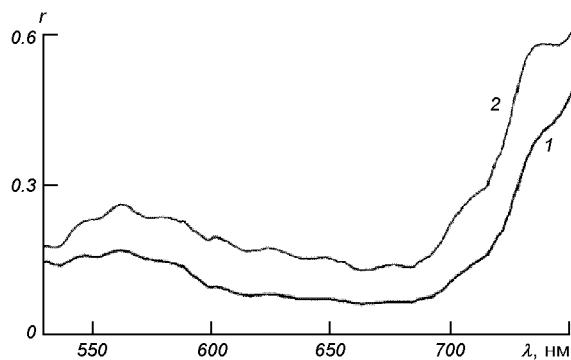


Рис. 8. Спектральные кривые листьев пшеницы (1) и рапса (2)

нескольких процентов. Различия графиков первой производной от указанных выше спектральных кривых также не превышают нескольких процентов. Форма спектральной кривой отражения соответствует лабораторным кривым, а отличия в области красного края при вариациях содержания хлорофилла имеют аналогичный характер. Спектральные кривые листьев пшеницы и рапса представлены на рис. 8.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Предложен новый подход к оцениванию концентрации хлорофилла в растительности, базирующийся на анализе формы исходной спектральной кривой в области красного края ($\lambda \lambda 680-750$ нм). Он основан на построении ковариационной матрицы по обучающей выборке и определении собственных векторов. Показано, что необходимо не более пяти главных компонентов для адекватного описания формы спектральной кривой, что позволило построить регрессионные модели концентрации хлорофилла в растительности.

2. Установлено, что есть нелинейная зависимость между содержанием хлорофилла и значениями главных компонентов. Для ее исследования были построены различные регрессионные модели (линейная, полиномиальная, билинейная и бикубическая), и исследованы их статистические характеристики. Установлено, что наилучшее приближение обеспечивает бикубическую регрессионную модель. Регрессионные моде-

ли исследованы на адекватность с помощью критериев Фишера и Стьюдента.

3. Реализация этого метода для условий полевого применения налагает специфические требования на измерительный комплекс. Они были сформулированы и воплощены в виде специализированного полевого прибора. Результаты полевых испытаний позволили оценить работоспособность прибора. Установлено, что аппаратно-программный комплекс устойчив к шумам измерения и не требует вычисления производных при оценивании концентрации хлорофилла.

Работа выполнена в рамках гранта УНТЦ № 2614.

1. Коцубей С. М. Сравнение информативных возможностей многозональной съемки и спектроскопии высокой разрешающей способности при дистанционном зондировании растительного покрова // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 2/3.—С. 41—48.
2. Коцубей С. М. Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 271—275.
3. Коцубей С. М. Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом диапазоне // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 185—190.
4. Коцубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Количественный анализ формы спектральной кривой отражения листьев растений как способ тестирования их состояния // Физиол. и биохимия культ. раст.—1988.—20.—С. 535—539.
5. Коцубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики.—Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
6. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. — М.: Лань, 2002.—736 с.
7. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // Plant Physiol.—1949.—24.—P. 1—15.
8. Bowyer P., Danson F. M. Sensitivity of spectral reflectance to variation in live fuel moisture content at leaf and canopy level // Remote Sens. Environ.—2004.—92.—P. 297—308.
9. Ceccato P., Flasse S., Gregoire J. M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. 2. Validation and applications // Remote Sens. Environ.—2002.—82.—P. 198—207.
10. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain // Remote Sens. Environ.—2001.—77.—P. 22—33.
11. Comon P. Independent component analysis. A new concept? // Signal Processing.—1994.—N 36 (3).—P. 287—314.
12. Davids C., Tyler A. N. Detecting contamination-induced

- tree stress within the Chernobyl exclusion zone // *Remote Sens. Environ.*.—2003.—85.—P. 30—38.
13. Horler D. N. H., Dokray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.*.—1983.—4.—P. 273—288.
 14. Kochubey S. M., Bidyuk P. I. A Novel approach to remote sensing of vegetation // *Proc. SPIE*.—2003.—5093.—P. 181—188.—(SPIE Conf. "AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security", 21—25 April 2003, Orlando USA).
 15. Lamb D. W., Steyn-Ross M., Schaare P., et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium spp.*) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations // *Int. J. Remote Sens.*.—2002.—23.—P. 3619—3648.
 16. Moran J. A., Mitchell A. K., Goodmanson G., Stockburger K. A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiology*.—2000.—20.—P. 1113—1120.
 17. Pinar A., Curran P. J. Grass chlorophyll and the reflectance red edge // *Int. J. Remote Sens.*.—1996.—17.—P. 351—357.
 18. Polischuk V. P., Shadchina T. M., Kompanetz T. I., et al. Changes in reflectance spectrum characteristics of *Nicotiana debneyi* plant under the influence of viral infection // *Arh. Phytopath. Pflanz.*.—1997.—31.—P. 115—119.
 19. Riggs G. A., Running S. W. Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer // *Remote Sens. Environ.*.—1991.—35.—P. 51—68.
 20. Smith K. L., Steven M. D., Coll J. J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. // *Remote Sens. Environ.*.—2004.—92.—P. 207—217.
 21. Yatsenko V. A., Kochubey S. M., Pardalos P. M., Zhan L. Estimation of chlorophyll concentration in vegetation using global optimization approach // *Proc. SPIE*.—2003.—5071.—P. 50—59.—("Technologies, Systems, and Architectures for Transnational Defence II", SPIE Conference "AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security", 21—25 April 2003, Orlando USA).
 22. Zarko-Tejada P. J., Miller J. R., Mohammed G. H., et al. Vegetation stress detection through chlorophyll a+b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery // *J. Environ. Qual.*.—2002.—31.—P. 1433—1441.
 23. Zarko-Tejada P. J., Pushnik J. C., Dobrowski S., Ustin S. L. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double peak red edge effect // *Remote Sens. Environ.*.—2003.—84.—P. 283—294.

NEW METHOD FOR REMOTE SENSING ESTIMATION OF CHLOROPHYLL CONTENTS IN VEGETATION AND ITS SOFTWARE REALIZATION

*V. O. Yatsenko, P. O. Khandriga, S. M. Kochubey,
V. V. Donets*

The problem of remote sensing estimation of vegetation chlorophyll content for condition monitoring by reflectance spectra is considered. We propose a way for the solution of the problem with the use of the principal components analysis method (PCA) and nonlinear regression models. A hardware-software complex is developed to realize the way. Some results of testing the complex and of its comparison with the first derivative method are presented.

УДК 528.85

М. А. Попов, С. Ю. Марков, С. А. Станкевич, А. Л. Бодня

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Система каталогизации и распределенного доступа к данным дистанционного зондирования Земли: концепция, архитектура, реализация

Надійшла до редакції 09.02.06

Викладено концептуальний підхід до створення системи каталогування та розподіленого доступу до даних дистанційного зондування, який реалізовано в Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України у вигляді пілотного проекту. Підхід враховує світовий досвід будування інфраструктур геопросторових даних. Розроблено профіль стандарту на метадані для аero- і космічних зображень, який засновано на міжнародних стандартах та реальних вимогах споживачів геопросторової інформації. Описано архітектуру системи та розглянуто особливості її програмно-апаратної реалізації.

Вступление

Высокое качество видовой (иконической) информации, получаемой сенсорами, которые устанавливаются на борту воздушных и космических летательных аппаратов, способствует все более интенсивному ее использованию при решении самых разнообразных задач из областей науки, промышленности, сельского хозяйства и др. Поэтому круг потребителей аэро- и космической информации и в мире, и в Украине неуклонно расширяется.

В любой организации, которая постоянно занимается решением разнообразных тематических задач, связанных с анализом данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), мониторинга территорий, картографирования местности с использованием аэро- и космических снимков и т. д., по мере решения подобных задач постепенно накапливается собственный фонд видовой (иконической) информации, эффективное использование которого невозможно без его систематизации.

С систематизацией фонда изображений связано обеспечение таких важных для практической работы условий, как:

- простой доступ для легитимных пользователей с одновременным запретом для всех остальных пользователей;
- оперативность доступа к метаданным и изображениям;
- возможность пополнения и обновления фонда как через внутренние, так и через внешние (включая международные) информационные каналы;
- возможность взаимного информационного обмена с другими организациями через современные коммуникационные каналы;
- информационная устойчивость (минимальная вероятность потери или искажения данных).

Удовлетворение перечисленных условий возможно в рамках функционирования системы каталогизации и распределенного доступа к данным ДЗЗ. Такая система создана в Научном центре аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины

(ЦАКИЗ) как пилотный проект. Ниже излагается концепция ее построения, а также описываются архитектура системы и особенности программно-технической реализации.

ИНФРАСТРУКТУРА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Составными частями решения проблемы создания в организации системы каталогизации и распределенного доступа к данным ДЗЗ, отвечающей современным требованиям, являются:

- формирование базы метаданных об изображениях, которыми располагает организация;
- организация хранения данных ДЗЗ;
- обеспечение взаимодействия данной организации с другими организациями в вопросах обмена сведениями об информационных ресурсах и их получения.

Как известно, метаданные — это документированная информация, которая улучшает техническое и смысловое понимание данных и связанных с ними процессов [<http://www.tdan.com/>].

В условиях все увеличивающегося количества способов хранения данных, многообразия интерфейсов пользователей, гетерогенности физических устройств обработки данных необходимость выработки стандартных способов доступа до данных становится все более важной. Решение проблемы гомогенного доступа до гетерогенных источников данных лежит в стандартизации метаданных, однако в настоящее время в мире не выработан единый универсальный подход к формированию метаданных. Вместе с тем рядом международных организаций инициированы работы, направленные на создание документов, устанавливающих стандарты на пространственные метаданные.

Наиболее известные из подобного рода работ следующие.

1. FGDC Content Standard for Digital Geospatial Metadata — стандарт на пространственные метаданные, разработанный Геологической службой США (U.S. Geological Survey) в рамках программы построения Национальной инфраструктуры геопространственных данных (НИГД)

[<http://www.fgdc.gov/metadata/contstan.html>]. Данный стандарт является одним из первых документов подобного рода, поэтому он уже довольно длительное время используется в различных странах мира при создании подобных документов.

2. CEN/TC 287 Env 12657 — европейский эквивалент стандарта на метаданные FGDC, разработанный Европейским комитетом по стандартизации (CEN) [<http://www.cenorm.be>]. Данный стандарт широко используется в европейских странах при создании профилей национальных стандартов на пространственные метаданные.

3. Стандарт ISO 19115 Geographic information — Metadata Международной организации по стандартизации [<http://www.isotc211.org/>]. Разработан ее техническим комитетом ISO/TC 211. Поскольку этот стандарт появился позже стандартов FGDC и CEN, его создатели учитывали требования упомянутых стандартов, и существенных различий между этими документами нет. Стандарты FGDC и ISO ближе друг к другу и более конкретны по содержанию по сравнению со стандартом CEN/TC [<http://www.ec-gis.org/Workshops/7ec-gis/papers/html/ruzicka/ruzicka.htm>].

В целом тенденции развития стандартов на геопространственные метаданные ведут к постепенному приближению содержания всех национальных и отраслевых стандартов к ISO 19115. Этот стандарт официально принят также консорциумом OpenGIS (www.opengeospatial.org).

Учитывая, что различным предметным областям характерна своя специфика работы с данными и метаданными, возникает необходимость создания так называемых «профилей» стандартов, т. е. некоторых расширений базовых стандартов, которые позволяют учесть особенности данной предметной области. В частности, в самом стандарте ISO 19115 описывается методика создания подобного «профиля». В исходном стандарте выделяются некоторые ключевые метаданные (рис. 1), которые полностью должны войти в профиль. Кроме того, из остальных метаданных выделяется та часть, которая должна войти в профиль, а также формируется дополнительный набор метаданных, отсутствующий в базовом стандарте, но необходимый для данной предметной области.

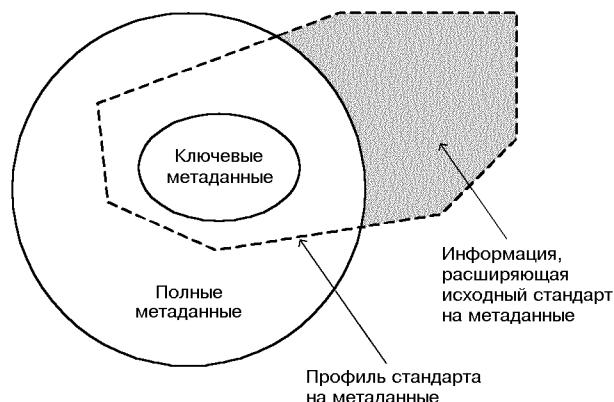


Рис. 1. Механизм формирования профиля стандарта

Таким образом, профиль должен включать:

- ключевые метаданные;
- обязательные элементы метаданных в обязательных информационных группах;
- условные элементы метаданных во всех обязательных информационных группах, если выполнено соответствующее условие;
- обязательные элементы метаданных во всех условных информационных группах, если выполнено соответствующее условие;
- условные элементы метаданных во всех условных информационных группах, если выполнено соответствующее условие.

Перечисленные требования должны безусловно учитываться при разработке профиля метаданных для любой организации, заинтересованной в эффективном использовании данных ДЗЗ. При этом необходимо учитывать, что вышеназванные стандарты на пространственные метаданные не совсем подходят для описания метаданных для данных ДЗЗ, поскольку в них отсутствуют некоторые информационные группы, важные для данной предметной области. В первую очередь это:

- идентификационные данные о миссиях, платформах и сенсорах;
- информация об орбите носителя;
- данные об уровне обработки изображения;
- полная информация о спектральном диапазоне (поддиапазонах) съемки;
- информация об условиях, в которых получено изображение;

- координатные данные, необходимые для привязки изображения;
- свойства сенсора, необходимые для привязки изображения.

По этой причине различные организации несколько лет назад начали работу по созданию специализированных стандартов на метаданные для данных ДЗЗ, которые являются расширениями базовых стандартов на пространственные метаданные. Наиболее важными являются:

- FGDC Content Standard for Digital Geospatial Metadata: Extensions for Remote Sensing Metadata — расширение стандарта на пространственные метаданные FGDC для данных ДЗЗ [http://www.fgdc.gov/standards/status/csdgm_rs_ex.html]. В него добавлены названные выше информационные группы для изображений, а также внесены некоторые другие изменения. В настоящее время идет доработка этого стандарта в направлении его гармонизации с требованиями соответствующего стандарта ISO;
- ISO 19115-2 Geographic Information — Metadata — Part 2: Extensions for imagery and gridded data — расширение стандарта ISO 19115 для метаданных пространственной информации, представленной в форме растровых изображений [http://www.isotc211.org/Outreach/Overview/Factsheet_19115-2.pdf]. Работа над этим документом пока не закончена. Планируется, что он будет содержать следующие дополнительные информационные группы, по сравнению с ISO 19115:
 - данные об уровне обработки данных;
 - информация об условиях, в которых получено изображение;
 - размеры и пространственное положение пикселей;
 - информация о спектральном диапазоне съемки;
 - идентификационные данные о миссиях, платформах и сенсорах.

Указанные данные вводятся как подклассы уже существующих классов стандарта ISO 19115, чтобы не нарушать его общую структуру классов.

При разработке стандартов на метаданные для данных ДЗЗ использовался также стандарт ISO 19130: Geographic Information — Sensor and data

model for imagery and girded data (Модели сенсоров и данных и для изображений и другой растровой информации) [<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/comm2.html>]. Материалы данного стандарта применялись для определения информационных групп, специфичных для данных ДЗЗ.

Вопросы организации хранения геопространственных данных и обмена ими были в начале 1990-х гг. предметом всестороннего и обстоятельного изучения в США при создании НИГД. В директиве (№ 12906 от 13 апреля 1994 г.), подписанной президентом Б. Клинтоном, Национальная инфраструктура геопространственных данных определяется следующим образом: «НИГД представляет собой совокупность технологических решений, политики, стандартов и человеческих ресурсов, необходимых для сбора, обработки, распространения и эффективного использования геопространственных данных».

Накопленный опыт создания и использования НИГД в США и других странах подсказывает, что успешное решение вопросов организации хранения геопространственных данных и обмена ими связано с:

- разработкой системы стандартов на пространственные данные и на технологии их обработки, а также на метаданные;
- созданием базовых наборов пространственных данных, включающих цифровую картографическую информацию;
- отработкой технологической инфраструктуры работы с пространственными данными, которая обеспечит пользователям возможность нахождения необходимых им базовых наборов пространственных данных и получения доступа к ним.

Технологическая инфраструктура работы с пространственной информацией реализуется путем создания так называемых клиринговых центров управления геопространственными данными, которые представляют собой «совокупность программных и организационных средств, предназначенных для упрощения поиска, оценки пригодности для решения некоторой задачи, а также получения цифровых геопространственных данных» [1]. Данному определению соответствует концептуальная архитектура, показанная на рис. 2. Основными компонентами клирингового центра являются локальный сер-

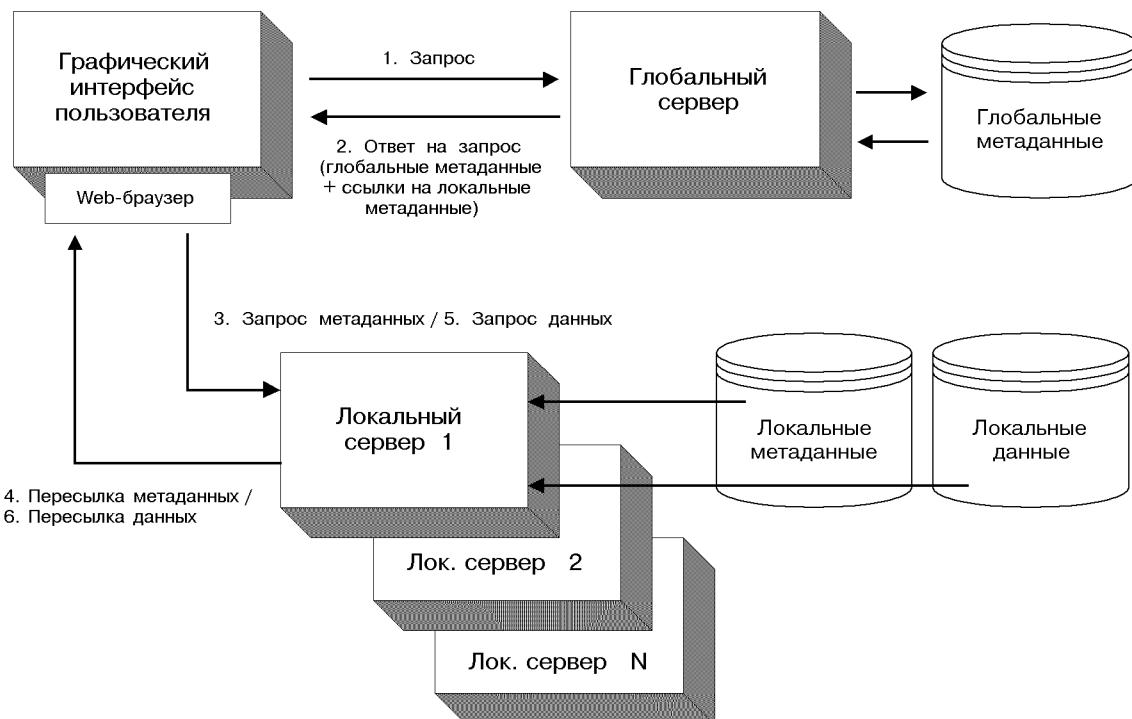


Рис. 2. Концептуальная архитектура клирингового центра

вер, в котором хранится информация о геопространственных ресурсах организации (локальные геопространственные данные и метаданные), а также глобальный сервер, который обеспечивает доступ к глобальным метаданным. Локальные метаданные — это данные о геопространственных данных, находящихся в организации, а глобальные метаданные — это их генерализованный (обобщенный) вариант, доступный для ознакомления внешним пользователям.

Пользователь, работающий с клиринговым центром, через графический интерфейс может обратиться с запросом к глобальному серверу (1), который даст ответ на этот запрос в виде глобальных метаданных либо ссылки на локальные метаданные (2). Пользователь также может обратиться к какому-либо локальному серверу с запросом на локальные метаданные либо данные (3 либо 5). В ответ на этот запрос ему пересыпаются запрошенные метаданные либо данные (4 либо 6). Необходимость в глобальных метаданных и соответствующих архитектурных элементах возникает тогда, когда организация осуществляет информационное взаимодействие с другими организациями. В противном случае можно ограничиться локальной частью данной архитектуры, причем ее конкретный вид зависит от задач организации и, соответственно, от требуемой для этого функциональности. Как видно из концептуальной архитектуры клирингового центра, основным предназначением локального и глобального серверов является реализация каталожных функций.

Эталонная архитектура, позволяющая реализовать каталожный сервис, представлена на рис. 3.

Эта архитектура описана в соответствующей спецификации консорциума OpenGIS [<http://www.opengeospatial.org/specs/>] и, таким образом, может претендовать на статус стандарта «де-факто», например в области геоинформационных систем (ГИС).

Многие государственные и коммерческие организации как за рубежом, так и в Украине, занимающиеся обработкой и распространением данных ДЗЗ, уже реализовали в том или другом виде клиринговые центры управлением данными ДЗЗ.

Так, по данным [<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/202.pdf>] в Корей-



Рис. 3. Эталонная архитектура каталожного сервиса

ском институте исследования проблем электроники и телекоммуникаций создан и функционирует на национальном уровне клиринговый центр управления космическими снимками, архитектура которого включает три основных сервера:

- 1) регистрация данных ДЗЗ;
- 2) управление данными;
- 3) передача данных ДЗЗ.

Используемый профиль стандарта на метаданные разработан на основе стандартов ISO 19115 и ISO 19115-2 (часть 2).

Французской компанией SPOT Image клиринговый центр реализован как часть web-портала компании [<http://www.spot.com/>]. Каталог поставляемых изображений доступен в режиме online. Структура метаданных, которые используют SPOT Image для описания изображений, не полностью совпадает с требованиями стандарта ISO 19115-2. Есть некоторые отличия в типах данных некоторых полей, в синтаксисе и семантике информации.

Одним из немногих украинских серверов управления данными ДЗЗ является web-сервер Государственного научно-производственного цент-

ра аэрокосмической информации, дистанционного зондирования Земли и мониторинга окружающей среды «Природа» [<http://www.pryroda.gov.ua/>]. В разделе «Услуги» имеется возможность просмотреть каталог снимков и выполнить заказ выбранных изображений.

Поиск изображения может быть выполнен по критериям:

- тип спутника;
- диапазон дат;
- координаты углов экстента изображения;
- выделение области на карте.

После ввода значений критериев выполняется поиск, в результате которого пользователь получает таблицу со списком найденных изображений, для которых выводится следующая информация:

- номер снимка;
- тип спутника;
- тип датчика;
- тип изображения;
- погодные условия (облачность);
- регион;
- дата.

Интерфейс пользователя производит хорошее впечатление: с одной стороны он достаточно

прост, с другой — позволяет выбрать необходимое изображение. Накопленные технологические, аппаратные, протокольные, интерфейсные и другие решения, которые нашли свое применение в известных клиринговых центрах, могут быть использованы в определенной мере при создании новых систем, работающих с данными ДЗЗ.

С учетом вышеизложенного при построении системы каталогизации и распределенного доступа к данным ДЗЗ необходимо было решить следующие основные задачи:

- разработать и обосновать профиль стандарта на метаданные данных ДЗЗ, хранящихся в ЦАКИЗ;
- разработать и обосновать архитектуру и концепцию развития системы;
- разработать предложения по программно-аппаратной реализации системы;
- построить пилотный образец системы.

Далее кратко описывается порядок решения названных задач.

Описание профиля стандарта на метаданные ДЗЗ. При создании профиля были использованы имеющиеся публикации в этой предметной области, опубликованные стандарты

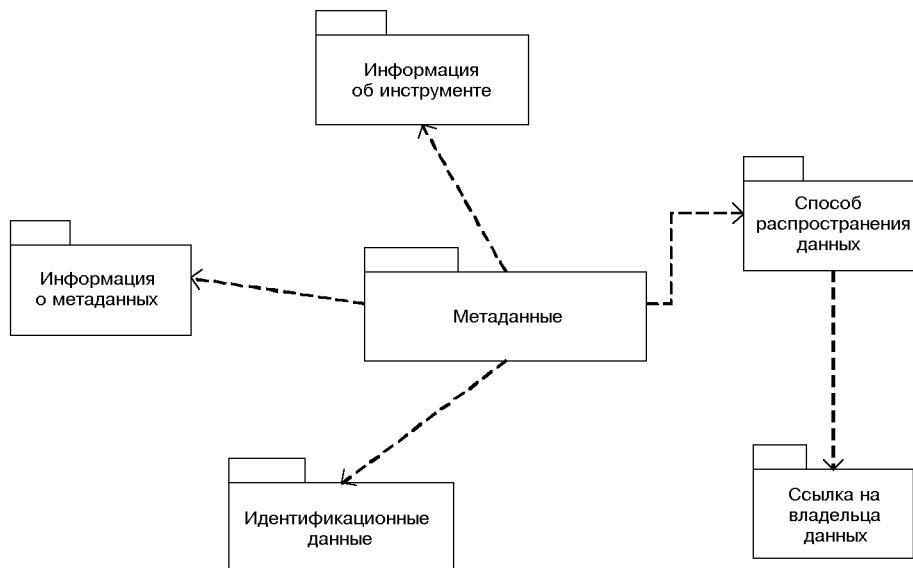


Рис. 4. UML-диаграмма профиля стандарта ЦАКИЗ

на метаданные для данных ДЗЗ, описанные выше подходы к созданию профилей стандартов. Был проведен анализ текущих и будущих потребностей ЦАКИЗ в отношении метаданных об изображениях, которые хранятся в организации. Сначала был произведен выбор международного стандарта на метаданные, который наиболее целесообразно использовать в качестве основы профиля стандарта ЦАКИЗ. Разумеется, наилучшим вариантом для этого мог быть стандарт ISO 19115-2 [<http://www.openspatial.org>], однако на момент начала выполнения описываемого проекта он еще находился в стадии разработки, и его окончательный вариант не был опубликован. Поэтому было решено в качестве исходной основы использовать аналогичный стандарт Геологической службы США.

При создании профиля стандарта были сохранены все наименования полей и типы данных, используемые в исходном стандарте. Поскольку на первом этапе построения системы от него не требуется сложной функциональности, содержание профиля стандарта было максимально упрощено. Содержание основных информационных групп разработанного профиля стандарта изображено на рис. 4 в виде диаграммы, созданной с использованием универсального языка моделирования UML (Universal Modelling Language). Из большого количества информационных групп, предлагаемых базовым стандартом, было выбрано четыре основных, которые содержат только самые необходимые данные об изображениях. Информация о метаданных организована по иерархическому принципу.

Для облегчения работы пользователя, а также для обеспечения лучшей поддержки целостности базы метаданных для некоторых полей вместо типа данных «текст» использован перечисляемый тип с конечным числом возможных значений соответствующего атрибута (либо доменное ограничение «любой текст» заменено на перечисляемую совокупность допустимых значений атрибута).

Чтобы реализовать такую возможность, для полей «Название миссии», «Датчик», «Уровень обработки» созданы словари, которые включают весь перечень допустимых значений соответствующих атрибутов. В качестве примера в таблице приведено описание поля «Уровни обработки».

Уровни обработки снимков

Название уровня обработки	Пояснение
Уровень 0	Декодированный и сформированный снимок с присоединенными к нему метаданными
Уровень 1	Откорректированный снимок, привязанный по данным орбиты носителя
Уровень 2	Геореференцированный снимок
Уровень 3	Дешифрированный снимок с легендой
Уровень 4	Тематическая карта, созданная с использованием снимка

Архитектура системы. Архитектура системы каталогизации и распределенного доступа к данным ДЗЗ, реализованной в ЦАКИЗ, показана на рис. 5.

При разработке архитектуры системы учитывались следующие обстоятельства:

- аппаратно-программная архитектура компьютерных ресурсов ЦАКИЗ;
- перспективы развития этих ресурсов на ближайшее будущее;
- текущие и перспективные потребности ЦАКИЗ в отношении управления накопленными в организации аэро- и космическими снимками (изображениями) и их метаданными.

Конечные пользователи, используя web-браузер, связываются с некоторым ресурсом (Внешний источник данных) в интернете, предоставляющим космические изображения (или аэроснимки), и получают эти изображения. Далее снимок помещается в локальное хранилище данных компьютера пользователя («Локальные данные»). Кроме того, пользователь должен передать метаданные полученного изображения администратору метаданных. Формирование этих метаданных выполняется в стандартном формате, который определяется описанным выше профилем стандарта на метаданные. Администратор метаданных проверяет полученное от пользователя сообщение на предмет отсутствия формальных ошибок и помещает новую запись о метаданных в базу метаданных, расположенную на его компьютере.

Таким образом, только администратор имеет право вносить любые изменения в базу метадан-

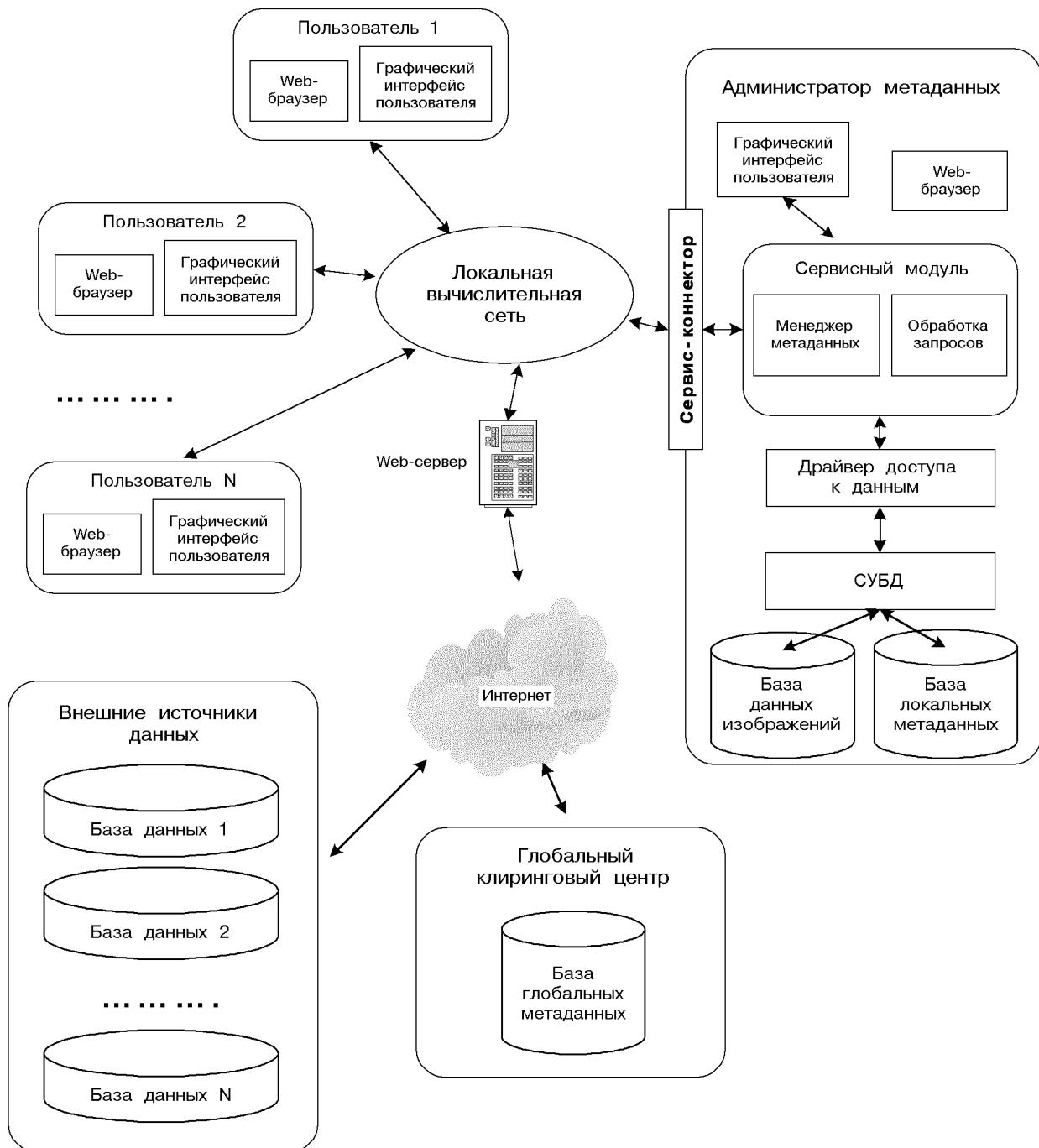


Рис. 5. Архитектура системы

ных (используется подмодуль «Менеджер метаданных» сервисного модуля). Если пользователь замечает ошибку в метаданных хранящегося у него изображения, исправления производятся также через администратора.

Если пользователь хочет сделать запрос к базе метаданных, чтобы узнать о наличии в базе ЦАКИЗ интересующих его изображений, он, используя графический интерфейс (GUI — Graphical User Interface), формирует запрос. В качестве параметров запроса могут выступать:

- дата съемки;
- географическое место съемки;
- географические координаты экстента, покрывающего район съемки;
- носитель;
- сенсор (датчик).

Запрос через локальную сеть пересыпается на компьютер администратора метаданных и далее в подмодуль «Обработка запросов» сервисного модуля. В соответствии с параметрами запроса из базы метаданных извлекается информация, которая пересыпается назад, на компьютер пользователя. В числе прочих данных там содержится ссылка на местоположение самого изображения.

В будущем предполагается несколько усовершенствовать архитектуру созданной системы. Основные отличия новой информационной инфраструктуры по сравнению с существующей будут состоять в следующем.

- Хранение всех изображений на одном сервере (сервере администратора базы метаданных). На том же сервере будет храниться, как и в настоящее время, локальная база метаданных этих изображений. К этим ресурсам обеспечивается централизованный доступ пользователей организации, а управление будет выполняться, как и сейчас, администратором базы метаданных.
- Создание сокращенной копии базы метаданных (глобальной базы метаданных), которая помещается на некоторый внешний (или глобальный) сервер. Предназначение этого сервера — предоставление информации о наличных в ЦАКИЗ изображениях для внешних пользователей.
- Более совершенный профиль стандарта ЦАКИЗ с точки зрения более полного описания изображений (расширения перечня

метаданных).

- Обеспечение записи информации о метаданных в XML-совместимый формат для стандартизации процедур обмена метаданными с другими организациями;
- Улучшение графического интерфейса пользователя, реализация в ней картографического компонента.

Предполагается, что периодически функциональность системы будет совершенствоваться и далее, и будут создаваться новые версии соответствующего программного обеспечения.

Программно-аппаратная реализация системы. Пилотная версия системы реализуется на аппаратных ресурсах, наличных в ЦАКИЗ. Для упрощения используется одноранговая сетевая инфраструктура на платформе Windows, в которой один из компьютеров играет роль администратора метаданных.

Для программной реализации сервисов работы с метаданными используются бесплатно лицензируемые программные продукты:

Apache — для реализации серверного компонента приложения;

MySQL — для реализации СУБД.

Это обеспечивает наименьшие расходы на создание соответствующих приложений, и в то же время снимает проблему лицензирования средств разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная система каталогизации и распределенного доступа к данным дистанционного зондирования Земли может быть развернута в любой организации, использующей в своей работе аэрокосмическую информацию.

Если же рассматривать проблему повышения эффективности использования распределенных геопространственных ресурсов более широко, то очевидной становится необходимость применения технологий создания геоинформационных порталов, на которых будут храниться ссылки на все эти ресурсы и краткое их описание. Очевидно, пришло время подумать о создании такого портала в масштабах Украины для данных ДЗЗ. При построении такого портала целесообразно использовать рекомендации консорциума OpenGIS, а также опыт, накопленный

геоинформационным сообществом. Несомненно, важнейшим элементом портала будет система метаданных о данных ДЗЗ, поэтому вопросы, обсуждаемые здесь, представляются нам довольно актуальными.

В настоящее время пилотный проект системы проходит опытную эксплуатацию. После этого можно будет ознакомиться с версией системы через сайт ЦАКИЗ www.casre.kiev.ua, и даже получить ее демонстрационную версию.

1. Geospatial data infrastructure: concepts, cases and good practice / Ed. by R. Groot, J. McLaughlin. — New York: Oxford Univ. Press, 2000.—286 p.

THE SYSTEM OF CATALOGUING AND DISTRIBUTED ACCESS TO REMOTE SENSING DATA: CONCEPTION, ARCHITECTURE, REALIZATION

*M. A. Popov, S. Yu. Markov,
S. A. Stankevich, A. L. Bodnia*

Our conceptual approach to system of cataloguing and distributed access to remote sensing data creation is considered. At present the system is realized as pilot project at the Scientific Centre for Aerospace Researches of the Earth of IGS of NAS of Ukraine. The approach takes into account the world experience of geospatial data infrastructures designing. The profile of standard for airborne and spaceborne imagery metadata is developed based on the international standards and real requirements of geospatial information consumers. The architecture of the system is described and some features of its hardware and software realization are considered.

УДК 550:531; 681.51

**В. М. Івченко¹, В. Є. Корепанов², Г. В. Лізунов³,
О. П. Федоров⁴, Ю. М. Ямпольський⁵**

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України

³Інститут космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, Київ

⁴Національне космічне агентство України, Київ

⁵Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

Іоносферний супутниковий проект «Іоносатс»

Надійшла до редакції 02.11.06

Викладено пропозиції щодо розробки іоносферного космічного проекту «Іоносатс», його наукові завдання, склад бортової апаратури та можливості реалізації. Пропонується створення космічної системи просторово-часового моніторингу полів і плазмових параметрів іоносфери з метою розвитку фундаментальних знань з фізики сонячно-земних зв'язків, контролю поточного стану й прогнозування космічної погоди, діагностики природних і техногенних катастрофічних явищ за допомогою низькоорбітального угруповання з трьох мікросупутників. До завдань проекту входять: розробка науково-методичних основ використання низькоорбітальних супутників для служби космічної погоди, відпрацювання технічних рішень; систематичне вивчення динамічного відгуку іоносфери на впливи зверху (сонячна й геомагнітна активність) і знизу (метеорологічні, сейсмічні та техногенні процеси); просторово-часовий моніторинг іоносферних збурень із метою співставлення з природними і техногенними катастрофічними явищами у нижній атмосфері й на поверхні Землі; організація синхронної роботи підсупутників електромагнітних і метеорологічних полігонів; калібрування сучасних прогностичних моделей спокійної та збуреної іоносфери. Проект «Іоносатс» запропоновано Національним космічним агентством України до європейської Програми космічної погоди й Програми глобального моніторингу і безпеки навколошнього середовища (GMES).

ВСТУП

Сучасний етап розвитку наукових космічних досліджень характеризується оптимізацією витрат на цю галузь практично в усіх країнах світу. Провідні світові космічні агентства, насамперед Національна адміністрація США з космосу й аеронавтики (NASA) та Європейське космічне агентство (ESA), намагаються концентрувати ресурси за певними напрямами, пов'язаними з розв'язанням прикладних завдань (наприклад, сухо практичних й комерційних) або навпаки, — великих пріоритетних фундаментальних проблем (cornerstone missions). При цьому, для

скорочення фінансових затрат, основна увага приділяється проектуванню наукових експериментів на базі платформ міні- та мікросупутників.

Саме останній шлях реалізації власного наукового космічного експерименту найбільш прийнятний для України, зважаючи на вкрай обмежене фінансування космічних досліджень. Єдину можливістю реалізувати в найближчі роки вітчизняний науковий космічний проект є об'єднання зусиль вітчизняних спеціалістів навколо цікавої для міжнародної наукової спільноти проблеми з оригінальною постановкою задачі, яка могла б привернути увагу закордонних нау-

ковців і через їхню участь й паритетне фінансування знизити витратну частину запланованого проекту.

З урахуванням такої ситуації і розроблено викладені нижче пропозиції щодо реалізації нового іоносферного супутникового проекту «Іоносатс». В його основу покладено великий доробок міжнародного колективу вчених, сформований при першій спробі реалізації космічного експерименту «Попередження» [37] та наступному етапі його розвитку в експерименті «Інтербол-Прогноз». Завданням проекту «Іоносатс» є космічний моніторинг стану іоносфери з метою розвитку фундаментальних наукових уявлень з фізики сонячно-земних зв'язків, контролю поточного стану й прогнозування космічної погоди, діагностики природних і техногенних катастрофічних явищ. Для проведення моніторингу пропонується створити угруповання з трьох низькоорбітальних мікросупутників, які виводяться на орбіту одним ракетоносієм. За сприятливих умов запуск космічної системи «Іоносатс» можливий у 2010 р.

Серед основних завдань проекту можна визначити такі:

1) розробка комплексу наукової апаратури (КНА) та науково-методичних основ використання низькоорбітальних мікросупутників для служби космічної погоди, відпрацювання технічних рішень;

2) систематичне вивчення динамічного відгуку іоносфери на впливи згори (сонячну та геомагнітну активність) і знизу (метеорологічні, сейсмічні та техногенні процеси);

3) організація синхронної роботи підсупутниковых електромагнітних (ЕМ) і метеорологічних полігонів;

4) калібрування сучасних прогностичних моделей спокійної та збуреної іоносфери.

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Даний проект є пропозицією Національного космічного агентства України (НКАУ) в європейську Програму космічної погоди (Space Weather — SW) і Програму глобального моніторингу й безпеки навколошнього середовища (Global Monitoring for Environment and Security — GMES). Згідно з роботою [45] термін «космічна погода»

(КП) означає зміну умов на Сонці, в сонячному вітрі, магнітосфері й іоносфері, які можуть впливати на роботу та надійність бортових і наземних технічних систем і загрожувати здоров'ю людини. Одним з важливих проявів КП є вплив факторів сонячної активності на іоносферу Землі. Саме на іоносферних висотах відбувається основне поглинання сонячного рентгенівського та ультрафіолетового випромінювання, а також значної частки корпускулярних потоків сонячного вітру. Короткохвильова частина випромінювання сонячних спалахів (ультрафіолет і рентген) зазнає дисипації переважно на висотах іоносферних шарів F, E і D, викликаючи так звані радіаційні збурення іоносфери [48]. Поглинання енергії корпускулярних потоків переважно відбувається у полярній іоносфері, причому в авроральних овалах струмові системи полярних сяйв (струми Біркеланда) є джерелом розігрівання нейтральної атмосфери на висотах Е і F. Це, у свою чергу, викликає генерацію цілої низки іоносферних збурень — від дрібномасштабної турбулентності до великомасштабних плазмових неоднорідностей, — які поширяються до екватора [29, 32, 34], та випромінювання ЕМ-хвиль. Можна сказати, що збурення навколоzemної плазмової оболонки потоками сонячного випромінювання та корпускул, які надходять згори, призводить до її «світіння» в широкому спектрі частот — від ультранизькочастотних до ультрафіолету, а сама іоносфера відіграє роль своєрідного екрану, що є індикатором КП.

Порушення радіозв'язку й роботи енергетичних та радіонавігаційних систем під час іоносферних збурень є одними з найвідоміших, але не єдиними проявами впливу космічних променів на іоносферу [45]. Оскільки навколоzemний космічний простір є місцем роботи пілотованих космічних апаратів та численних автоматичних супутниковых систем, а їхня кількість і різноманітність буде лише зростати, моніторинг іоносферного рівня КП набуває все більшого практичного значення.

Поки що мова йшла про іоносферні збурення, які є відгуком на сонячну активність, тобто на вплив зовнішніх відносно Землі факторів. Останнім часом акцент щодо вивчення збурень у навколоzemній плазмі частково змістився у бік вивчення впливів «знизу», які пов'язані з пото-

ками енергії з нижніх шарів атмосфери та від поверхні [50].

Велика кількість спостережних даних свідчить про те, що у параметрах іоносфери локально відзеркалюються метеорологічні явища (грози, циклони, особливості приземної циркуляції атмосфери, тропосферна конвекція [3, 23, 33, 35, 44, 46, 47, 51]), техногенні фактори (запуски потужних ракет-носіїв, сильні промислові й військові вибухи, випромінювання ліній електромереж й «нагрівних» радіопередавачів [29, 30, 36, 54]). Численні спостереження вказують на можливість впливу тектонічних процесів на стан іоносфери (виверження вулканів, цунамі, землетруси й процеси їхньої підготовки [4, 10, 18, 19, 25, 49]). Це дозволяє говорити про «терагенні» явища в іоносфері, тобто про плазмові збурення, викликані приповерхневими природними й штучними джерелами енерговиділення. Самостійний інтерес становлять власне моніторингові спостереження іоносфери з метою контролю зазначених джерел, у першу чергу для виявлення небезпечних і катастрофічних явищ, що відбуваються на Землі [2, 21]. У цілій напрям виділися дослідження можливих іоносферних провісників землетрусів [10, 26, 28, 52] і, в перспективі, їхнього практичного використання для прогнозу землетрусів [42].

Терагенні ефекти в іоносфері залишаються мало вивченими і в експериментальному, і в теоретичному аспектах. Складною проблемою є ідентифікація джерел іоносферних збурень, а також селекція конкретних типів збурень на загальному тлі різноманітних варіацій. Тільки невелика частина даних була отримана в експериментах із достеменно ототожненими або спеціально підготовленими джерелами впливів на іоносферу (ядерними й промисловими вибухами [29, 30]). Упереджаній більшості спостережень природних іоносферних варіацій їхній зв'язок з подіями «вгорі» та «внизу» був лише гіпотетичним.

Очевидно, що вивчати іоносферні прояви КП *in situ* найзручніше за допомогою космічних апаратів, розташованих «всередині» іоносфери, близче до головного максимуму електронної концентрації плазми. Зручною платформою для довгострокового моніторингу іоносферної плазми могла б бути Міжнародна космічна станція (МКС) з висотою орбіти 350 км, однак дуже

високий рівень власних ЕМ-шумів та суттєвий вплив на плазмове оточення, створюваний самою станцією, не дає змоги спостерігати іоносферні збурення з необхідною чутливістю.

Ще одним важливим спонукальним мотивом до здійснення іоносферного супутникового проекту є необхідність уточнення й калібрування моделей просторово-часового розподілу навколоземної плазми. Основою прогнозування стану КП та її змін є моделювання фонових (незбурених) характеристик іоносфери та ЕМ полів. Поряд із стандартними наземними методами дистанційної діагностики іоносфери (методи вертикального зондування й некогерентного розсіювання), супутникові контактні вимірювання іоносферних параметрів дозволяють у реальному часі зіставляти й коригувати їхні модельні представлення.

Наведені аргументи обґрунтують актуальність викладених вище наукових завдань. Для їхнього виконання необхідно розробити супутниковий проект, який би відповідав наступним вимогам.

- Вибір вимірюваних параметрів, чутливість і динамічний діапазон наукових приладів, рівень ЕМ-чистоти космічних апаратів (КА) повинні забезпечувати реєстрацію іоносферного відгуку на впливи «згорі» й «внизу».
- Орбіта супутникового угруповання має бути якомога нижчою за умови прийнятного часу життя КА. Компромісом могла б бути кругова орбіта з висотою 450 км, що приблизно на 150 км вище від максимуму щільності іоносферної плазми. Термін функціонування супутникового угруповання тоді складатиме приблизно два роки.
- Моніторингові режими вимірювань у пропонованому проекті повинні бути основними, що задовольняє вимогам програми GMES — безперервність вимірювань. Сучасні дослідження в галузі КП також вимагають довгих і неперервних рядів даних, які дозволяють відслідковувати динамічні зв'язки іоносферних збурень з джерелами «вгорі» та «внизу».
- Орбітальне угруповання повинно становити «клaster» із не менш ніж трьох мікросупутників з одинаковим або майже одинаковим складом комплексу наукової апаратури (КНА). Просторове рознесення одинакових давачів в орбітальному угрупованні дозволить оціню-

вати градієнти вимірюваних величин, відновлювати просторовий спектр плазмових неоднорідностей і флюктуацій характеристик полів, локалізувати плямисті структури в іоносфері (ділянки турбулентності, рухливі іоносферні неоднорідності, «бабли» та ін.), вимірювати «діаметри» магнітних силових трубок на різних висотних рівнях, визначати просторові масштаби техногенних збурень та ін. Використання одночасно декількох КА також необхідне для ущільнення покриття земної поверхні орбітальною сіткою та покращення роздільної здатності супутникового моніторингу.

- Вимірювальні комплекси всіх трьох супутників повинні мати синхронні циклограми реєстрації польових електромагнітних параметрів, що надасть змогу використати режим просторово-часової когерентної обробки даних, зокрема УНЧ-ННЧ-інтерферометрію.

За всю космічну епоху відбулося лише близько півтора десятка запусків іоносферних супутників проектів (наближеність цифри пов'язана з неточністю дефініції — який супутник вважати «іоносферним»). Очевидно, жоден з них не задовольняв усі висунуті у проекті вимоги одночасно. У період від 1963 до 1976 р. була запущена серія з п'яти супутників «Атмосфера Експлорер» для вимірювання розподілу параметрів верхньої атмосфери та іоносфери [27, 41]. Орбіти супутників перекривали весь діапазон широт від екваторіальних до полярних і висот від 150 км до декількох тисяч кілометрів. Бортові прилади здійснювали вимірювання хімічного складу атмосфери, у тому числі іонізованої та нейтральної складових, а також температур і швидкостей дрейфу різного виду частинок. Запис даних здійснювався з порівняно невеликою частотою 0.1 ... 1 Гц, що дозволило одержати й передати на Землю довгі ряди неперервних вимірювань атмосферно-іоносферних параметрів.

В 1981 р. були запущені два супутники «Дайнемікс Експлорер», призначенні для вивчення динаміки іоносферної плазми, в тому числі хвильових процесів. Супутники мали порівняно невелику висоту перигею (300 і 460 км) та були оснащені хвильовими комплексами для вимірювань ЕМ-емісій в різних діапазонах частот (з використанням у давачах частотних фільтрів).

Проекти «Атмосфере Експлорер» та «Дайнемікс Експлорер» без перебільшення стали класичними, їхні бази даних і сьогодні широко використовуються для наукових досліджень. Звісно, з погляду сьогодення можливості експериментів того часу виглядають досить скромно. Так, використана частота вибірки 0.1 Гц забезпечила просторову роздільність вимірювання лише на рівні 160 км.

Наприкінці 1980-х — в середині 1990-х рр. була здійснена серія космічних проектів з дослідження ЕМ-емісій, нестійкостей і турбулентності іоносферної плазми: «Вікінг», «Активний», АПЕКС, «Фрея» та ін. [41]. Супутники запускалися на висоти зовнішньої іоносфери і внутрішньої магнітосфери з перигеями 440—650 км, апогеями — кілька тисяч кілометрів. До складу наукової апаратури входили електричні й магнітні зонди для вимірювань параметрів плазмових хвиль у діапазоні частот від часток герц (квазістанціонарні струмові структури й МГД-хвилі) до десятків мегагерц (високочастотні типи плазмових хвиль). Крім того, вимірювалися параметри фонової плазми й надтеплових частинок. Якісно нові можливості збору й передачі на Землю наукової інформації були реалізовані на шведсько-німецькому супутнику «Фрея». Частота опитування у ВЧ-каналі системи збору наукової інформації (СЗНІ) цього супутника становила 8 МГц, що дозволяло реєструвати не лише спектри, але й хвильові форми плазмових емісій, включно з високочастотними ленгмюрівськими коливаннями, спостерігати їхнє виникнення та розпад, досліджувати зв'язок хвильових збурень у різних діапазонах частот.

Перелічені проекти загалом не ставили за мету проведення моніторингових вимірювань. Наукова апаратура, як правило, вмикалася у визначеніх ділянках (скажімо, в авроральних зонах або у заздалегідь запланованих місцях проведення активних експериментів) і потім вимикалася. Велика увага надавалася здійсненню так званого «спалахового» режиму вимірювань, коли реєстрація даних відбувається протягом досить короткого проміжку часу (який залежить від обсягу бортової пам'яті), але з максимальною роздільністю у часі паралельно для багатьох приладів (каналів).

Ідею супутникового моніторингу іоносфери значною мірою втілює сучасний французький

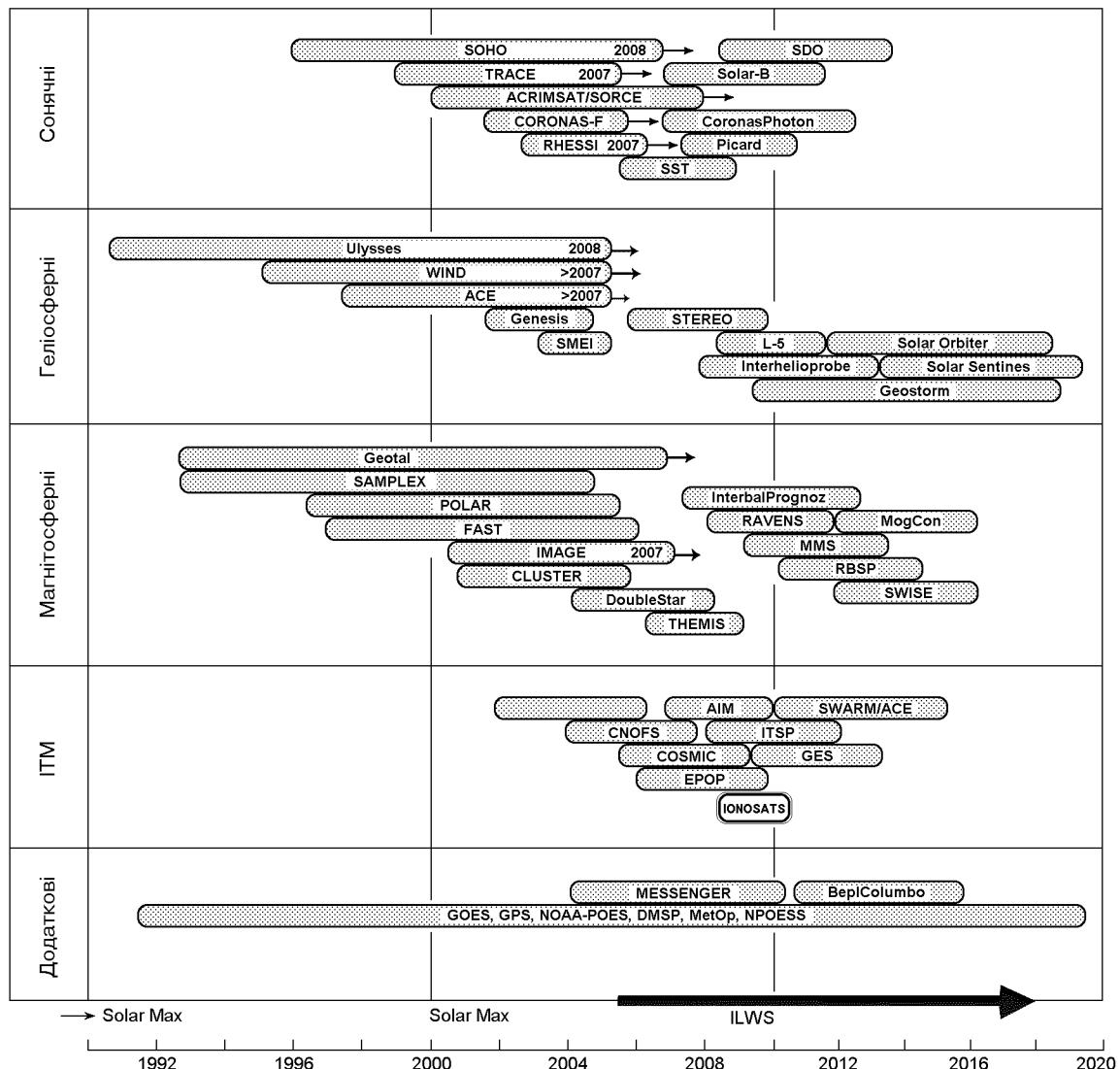


Рис. 1. Сучасні й плановані до здійснення проекти дослідження сонячно-земних зв'язків і моніторингу КП [55]. Обведений прямокутник — експеримент «Іоносатс».

проект DEMETER; супутник був запущений 29 червня 2004 р. на колову полярну сонячно-синхронну орбіту з висотою близько 700 км. Корисне навантаження мікросупутника становлять прилади для вимірювання електричних і магнітних полів, спектрометр енергійних частинок і аналізатори пазами, призначенні для реєстрації іоносферних збурень. Сучасна система СЗНІ та телеметрія забезпечують передачу на Землю у цифровій формі результатів вимірювань спектрів і хвильових форм сигналів. Вимірюван-

ня виконуються як у «спалаховому» режимі, так і неперервно на ділянках орбіт, які лежать за межами полярних шапок. Вимкнення наукової апаратури в ділянці широт вище 70° є принциповим рішенням авторів проекту, що, на наш погляд, знижує потенційну цінність проекту в цілому.

Останнім часом ESA і NASA розробляють супутниковий сегмент служби КП (рис. 1, [55]). Протягом найближчих років передбачається здійснити запуск цілого ряду високоорбітальних

супутників для моніторингу «верхніх поверхів» КП: сонячної активності, викидів корональних мас, збурень параметрів сонячного вітру й магнітосфери, динаміки радіаційних поясів. Опис зазначених проектів дано на веб-сторінках «Science missions» і «ESA Space Weather Site». Хоч і з дещо різними цілями, але з дуже близьким складом КНА та конфігурацією супутникових угруповань, плануються також проекти SWARM (ESA) та CSES (Китай). Пропонований український іоносферний проект відрізняється від цих аналогів і зможе органічно доповнювати міжнародні зусилля з напрямку досліджень КП.

Квінтесенцію проекту «Іоносатс», його відмінності від того, що робилось раніше і що пропонується іншими космічними агентствами зараз, можна сформулювати у вигляді наступних основних положень.

- Орбітальне угруповання проекту становить кластер із трьох мікросупутників з якомога більш ідентичним складом наукової апаратури (багатопозиційні вимірювання).
- Супутникове угруповання виводиться на колову орбіту з висотою 400—450 км (іоносферний проект).
- Орбіта угруповання полярна і не сонячно-синхронна (майже повне покриття поверхні Землі орбітальною мережею для всіх значень місцевого часу).
- Взаємна відстань між супутниками угруповання протягом довгого часу контролювано утримується в діапазоні від декількох сотень до декількох тисяч кілометрів (багатопозиційна діагностика середньомасштабних іоносферних збурень).

При цьому найцікавішим було б розташування супутників на одному висотному рівні в конфігурації трикутника. Два супутники повинні бути виведені на однакову орбіту, один апарат рухається за іншим, забезпечуючи вимірювання на обох КА при однаковому ході фонових іоносферних параметрів (дobbyй та широтний тренд). Орбіта третього КА при тій же висоті має лежати в іншій площині (за рахунок зміни нахилу чи довготи вузла орбіти), що й призведе до трикутної конфігурації взаємного розташування апаратів. Успішне розв'язання такої задачі підтримки заданої відстані між космічними апаратами вже було продемонстроване КБ «Південне» в експерименті «Інтербол-1» (ке-

рування мікросупутником «Магіон»).

Полярна орбіта дозволить супутникам пролітати над територіями всіх зацікавлених країн — потенційних учасників чи користувачів даними проекту і перетинати особливі ділянки іоносферних широт: авроральні овали, L-оболонки радіаційних поясів, екваторіальну аномалію та ін. Орбіту слід реалізувати не сонячно-синхронною з метою дослідження залежності іоносферних явищ від місцевого часу (дobbyї варіації).

На певних витках супутникове угруповання буде перетинати полярні каспи, область головного іоносферного провалу, проходити над наземними іоносферними обсерваторіями, в тому числі над потужними КХ-передавачами (нагрівними стендами), що дозволить здійснити синхронні спостереження й комбіновані експерименти з активного впливу на іоносферу. Значний інтерес викликає проведення синхронізованих нагрівних експериментів на авроральному стенді Європейської асоціації іоносферного розсіювання EISCAT (м. Тромсø, Норвегія), нагрівних стендах HAARP, HIPAS (Аляска, США) і «Сура» (Росія). Варто передбачити й експерименти з використанням національних засобів активного зондування: радара некогерентного розсіювання Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України (м. Харків) і акустичного джерела Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України (ЛЦ ІКД НАНУ—НКАУ, м. Львів).

СКЛАД КОРИСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Основними інформативними параметрами іоносферного відгуку на впливи «згори» та «знизу» пропонується вибрати електродинамічні характеристики іоносфери. Перш за все викликають інтерес варіації квазістатичних електрических та магнітних полів і електричного струму, які є діагностичною ознакою магнітогідродинамічних рухів іоносферної плазми, а також коливань нейтральної атмосфери на висотах динамо-області 80—130 км [23]. В полярних широтах МГД-варіації також є ознакою електродинамічного впливу з боку магнітосфери, у тому

числі проекції на іоносферу поля великомасштабної магнітосферної конвекції, збудження струмових систем Біркеланда (які відповідають за полярні сяйва) та ін. [11].

Як сучасний і вдалий прототип бортового вимірювального комплексу для проведення електромагнітних вимірювань розглянемо інструментальний комплекс проекту «Варіант» [6, 9, 39]. Особливий інтерес викликає один із приладів комплексу — хвильовий зонд WP, який є новою розробкою Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України та Інституту космічних досліджень Російської академії наук. Цей прилад призначений для одночасної реєстрації електричного потенціалу, магнітного поля та електричного струму в космічній плазмі. Дані вимірювань приладу WP дозволять дослідити модовий склад плазмових хвиль, тобто встановлювати хвильовий вектор та частоту збурення в нерухомій системі відліку [39, 53], що є важливою задачею радіофізичних спостережень іоносфери.

Використання одночасно трьох давачів WP, орієнтованих взаємно ортогонально і винесених в плазму на досить довгих (понад 4 м) штангах, дозволить з високою точністю виміряти вектор флюктуації магнітного поля \mathbf{B} , густину електричного струму \mathbf{J} та значення електричного потенціалу φ_i в трьох точках простору. Для обчислення повного вектора електричного поля \mathbf{E} необхідно знати потенціал у ще одній, четвертій точці. Відповідне вимірювання може бути виконане з використанням стандартного електричного зонда EP, встановленого безпосередньо на корпусі КА [17].

Наступним важливим завданням є реєстрація пульсацій квазіпостійного магнітного поля Землі. З цією метою можна використати вітчизняний ферозондовий магнітометр FGM [7], який на відміну від індукційних магнітометрів, що нині широко застосовуються в космічних експериментах (наприклад в DEMETER), є чутливим і на низьких частотах.

Прилади WP, EP та FGM пройшли успішні випробування в недавньому експерименті «Варіант» на супутнику «Січ-1М» (запущений 24 грудня 2004 р.) [39].

На подальшому етапі підготовки проекту бу-

дуть розроблятись режими вимірювань на борту супутників та передачі даних вимірювань на Землю. Через обмеження на обсяг бортової пам'яті та пропускну здатність інформаційної радіолінії максимальна частота дискретизації сигналів вимірювань є обмеженою. У моніторингових режимах спостережень (тривалих та неперервних) ця частота в принципі не може бути дуже високою і, ймовірно, не буде перевищувати 1 кГц. Протягом короткочасних «спалахових» сеансів вимірювань частота дискретизації, звісно, буде значно вищою. Такий підхід забезпечить детектування квазістанціонарних полів та струмів, про які йшла мова вище, а також хвильових форм іоносферних емісій УНЧ-ННЧ-діапазону: шипінь, іонних вістрів, іонно-циклотронних коливань та ін. [1, 12]. Що стосується вищих частот, то у моніторингових режимах вимірювань доцільно буде обмежитися передачею на Землю лише усереднених по часу спектрів сигналів. Таким чином, ми отримаємо інформацію про наявність або відсутність хвильової активності в різних спектральних діапазонах та за частотами нижньо- і верхньогібридних шумів зможемо незалежно оцінювати концентрацію (і деякі інші параметри) іоносферної плазми.

Відповідним приладом для вимірювань спектру плазмових хвиль може бути радіочастотний аналізатор спектра RFA, розроблений в Центрі космічних досліджень Польської академії наук для проекту «Обстановка» на борту МКС [38]. В максимальній комплектації цей прилад дозволяє реєструвати 3D-спектри електричного і магнітного полів. Але через обмеження на масу КНА та загальну кількість штанг, які можуть бути встановлені на борту мікросупутника, для проекту «Іоносатс» доцільно обмежитись використанням лише вимірювача спектру однієї складової електричного поля.

Ще одним приладом у складі КНА повинен бути датчик заряджених частинок для прямих вимірювань концентрації плазми, а також електронної та іонної температур. Знання параметрів фонової плазми є необхідним для правильної інтерпретації хвильових процесів. Крім того, такий давач дозволить безпосередньо реєструвати іоносферні неоднорідності різних просторових масштабів, у тому числі дрібномасштабну іонно-звукову турбулентність, рухомі іоносферні

Таблиця 1. Характерні величини збурень електромагнітного поля, плазми та нейтральних частинок на висоті 400 км

Явище	Параметри сигналу
Квазистаціонарні поля та струми, МГД-збурення УНЧ-діапазону (< 30 Гц)	МПЗ: 30000 ... 60000 нТ Варіації: МПЗ $\delta B \sim 1$ нТ, $\delta B_{\max} \sim 300$ нТ Струми: $j \sim 0.1$ мкА/м ² , $j_{\max} \sim 10$ мкА/м ² Електростатичне поле: $E \sim 1$ мВ/м, $E_{\max} \sim 0.1 \dots 1$ В/м. Мінімальний масштаб МГД-структур $L_{\min} \sim 1$ км
ННЧ-хвилі (30—3000 Гц)	$B \sim 0.01 \dots 1$ нТ, $E \sim 0.01 \dots 1$ мВ/м, $j \sim 0.1$ мкА/м ²
ДНЧ- і НЧ-хвилі (3—300 кГц)	$B \sim 0.0001 \dots 0.01$ нТ, $E \sim 1 \dots 200$ мВ/м
ВЧ хвилі (3—30 МГц)	$B \sim 1 \dots 10$ нТ, $E \sim 50 \dots 100$ мВ/м
Плазмові неоднорідності	$n_i \sim 10^5$ см ⁻³ , $\delta n_i \sim 1000 \dots 10000$ см ⁻³ , $\delta n_{i\max} \sim 10^5$ см ⁻³ Просторовий масштаб: від 10 ... 100 м (іонно-звукова турбулентність) до 300 ... 3000 км (РІЗ, «баблі»)
Неоднорідності нейтральної атмосфери	$n_n \sim 10^7$ см ⁻³ , $\delta n_n \sim 10^5$ см ⁻³ , $\delta n_{n\max} \sim 10^6$ см ⁻³ Довжина хвилі АГХ 100 ... 1000 км

Таблиця 2. Модельний склад корисного навантаження

Давачі	Вимірювані величини	Технічні характеристики	Розробники
Хвильові зонди WP	Густота струму: діапазон частот 0.1 Гц — 40 кГц, шум 10^{-13} А/(см ² Гц ^{1/2}) Змінне магнітне поле: діапазон частот 0.1 Гц — 40 кГц шум 0.02 пТл/Гц ^{1/2} Потенціал електричного поля: діапазон частот 0.1 Гц — 40 кГц шум 10 нВ/Гц ^{1/2}	Споживана потужність < 0.15 Вт Маса: 0.225 кг Габарити: Ø 30 × 305 мм	ЛІЦ ІКД НКАУ-НАУ, Львів
Електричний зонд ЕР	Потенціал електричного поля: діапазон частот 0—200 кГц шум 10 нВ/Гц ^{1/2}	Споживана потужність: < 0.2 Вт Маса: < 0.2 кг Габарити: Ø 60 × 182 мм	ЛІЦ ІКД НКАУ-НАУ, Львів
Феррозондовий магнітометр постійного поля FGM	Вектор магнітного поля: діапазон частот 0—1 Гц, динамічний діапазон ±65 мкТл	Споживана потужність: < 0.4 Вт Маса: давача < 0.1 кг, блоку електроніки < 0.3 кг	ЛІЦ ІКД НКАУ-НАУ, Львів
Аналізатор спектра електричного поля RFA	Частотний спектр компоненти електричного поля в діапазоні 0.1—10 МГц	Підлягає розробці	Центр космічних досліджень ПАН
Давач кінетичних параметрів плазми DN-DE	Концентрація нейтральних частинок n_i : динамічний діапазон $10^4 \dots 10^{10}$ см ⁻³ Концентрація заряджених частинок n_e : динамічний діапазон $10^3 \dots 10^{11}$ см ⁻³ Температури електронів, іонів T_i, T_e : динамічний діапазон 0.1 еВ ... 1.5 кеВ	Габарити: DN: Ø 50 × 85 мм DE: Ø 12 × 248 мм Споживана потужність: < 2 Вт	ІТМ НАНУ, Дніпропетровськ
Давач енергійних частинок STEP	Густота потоку й енергетичний спектр надтеплових частинок	Підлягає розробці	Харківський національний університет
CЗНІ	Підлягає розробці		ЛІЦ ІКД НКАУ-НАУ, Львів

збурення, великомасштабні структури іоносфери типу провалу та екваторіальної аномалії.

Низька орбіта супутникового угруповання проекту «Іоносатс» надасть можливість спостережень хвильових процесів і в нейтральній складовій атмосфери. Згідно з існуючими уявленнями, хвилі густини нейтральної атмосфери є важливим чинником впливу на іоносферу знизу [33, 43]. Спостереження атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) на іоносферних висотах давно викликає інтерес, але стикається зі значними практичними труднощами; безпосередні вимірювання АГХ з борту супутника досі нечисленні. Головна проблема полягає в тому, що через зростання атмосферної в'язкості та тепло-провідності з висотою АГХ не можуть поширюватися вище 500—600 км. Майже весь архів прямих супутникових вимірювань АГХ створено на основі лише двох низькоорбітальних проектів 1970-х років «Атмосфере Експлорер-Е» та «Атмосфере Експлорер-С».

Для прямої реєстрації параметрів нейтральної та іонізованої складових атмосфери ми пропонуємо ввести до складу КНА «Іоносатс» датчик кінетичних параметрів DN-DE, який є оригінальною розробкою Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України і ще не проходив космічних випробувань [22].

Останнім з пропонованих до складу КНА наукових приладів є аналізатор енергетичного спектру електронів, протонів і α -частинок STEP, розроблений у Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна [20]. Цей прилад може бути допрацьований під обмеження мікросупутника для реєстрації висипань енергійних частинок з радіаційних поясів та зони аврорального квазізахоплення (електронів з енергіями 10—100 кeВ і протонів з енергіями 100 MeВ). Оскільки переведення частинок у конус втрат пов'язано з розсіянням на вістлерах, вимірювання корпускулярних вторгнень мають проводитись синхронно з вимірюваннями ДНЧ-емісій.

Очікувані рівні сигналів, які повинні реєструватися давачами КНА «Іоносатс», наведені в табл. 1. Подано орієнтовні значення, які дають уявлення про порядки вимірюваних величин [1, 12, 17, 19, 21, 23]. Зрозуміло, що динамічні діапазони приладів повинні перекривати їх із

достатнім запасом. Серед вимірюваних параметрів найбільшими варіаціями характеризуються амплітуди радіоемісій, які, залежно від частоти, складають $E = 0.0001 \dots 1$ В/м, $B = 0.001 \dots 10$ нТ. В деяких спостереженнях амплітуди іонно-звукових хвиль досягали декількох В/м, при цьому густина енергії хвильового збурення була порядку густини теплової енергії плазми.

Модельний склад КНА наведено у табл. 2. Тут не показано GPS-приймач, який вважається обов'язковим компонентом службової апаратури платформи-носія, і сигнали точного часу та положення від якого сприйматимиме СЗНІ.

Для створення орбітального угруповання можуть бути використані платформи мікросупутників MC-2-8 (розробка й виготовлення КБ «Південне») і/або наносупутник для електромагнітних вимірювань «Космічний буй» («Space Buoy» — розробка ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ). Орієнтовне компонування давачів КНА на платформі MC-2-8 показано на рис. 2.

Ми вважаємо, що при належній підтримці Україна має достатній науково-методичний та технічний доборок, щоб навіть самостійно у стислі терміни реалізувати проект «Іоносатс».

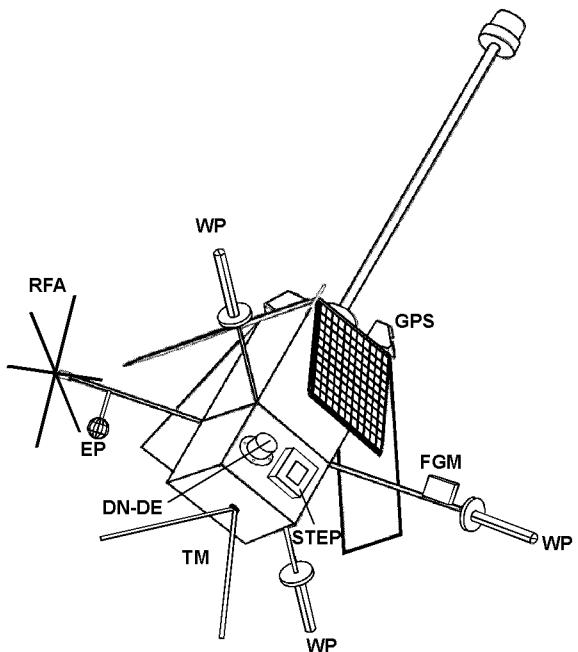


Рис. 2. Розташування давачів на платформі мікросупутника MC2-8.

Комплектація й виготовлення КНА у міжнародній кооперації, розробка програм космічних експериментів, створення наземного сегменту збирання й опрацювання даних можуть бути проведені на підставі розробок попередніх років у рамках проектів «Попередження», «Інтербол-Прогноз», «Варіант», «Український молодіжний супутник» [5, 8, 13–16, 37]. Ці проекти, за винятком проекту «Варіант», не були здійснені. Тим не менше, під час виконання в 2005 р. проекту «Варіант», незважаючи на частково невдалий запуск супутника «Січ-1М», українські фахівці набули практичного досвіду постановки й проведення електромагнітних супутникових експериментів [39].

Слід також відзначити великий доробок України в організації підсупутникового юносферного зондування, що дозволяє калібрувати бортові прилади й розширювати висотний діапазон діагностики плазмових параметрів [24]. У першу чергу необхідно згадати радар некогерентного розсіювання Інституту юносфери НАНУ, багатопозиційний когерентний КХ-локатор, радіотелескоп УТР-2 і радіоінтерферометр УРАН Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, стенд часткових відбиттів ХНУ ім В. Н. Каразіна (усі — м. Харків), а також комплексну юносферну обсерваторію на станції «Академік Вернадський» НАНЦ Міністерства освіти і науки України в Антарктиді [8]. Продуктивним також відається використання пристроїв частотно-кутового зондування, розроблених в Україні і розгорнутих в Антарктиді й Новій Англії (США) [31]. Їхніми характерними рисами є висока інформативність, простота реалізації, використання випромінювань наземних мовних КХ-передавачів як сигналів зондування, можливість швидкого розгортання, зокрема на європейському континенті [27]. Немає сумнівів, що у випадку реалізації проекту наземний супровід буде підтримано багатьма за кордонними юносферними обсерваторіями, з якими вже зараз Україна має тісну наукову співпрацю.

ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Експеримент «Юносатс» був запропонований Національним космічним агентством України

для Європейської програми GMES. У процесі його підготовки відбулося також обговорення цілей і наукових завдань експерименту з закордонними фахівцями, зацікавленими у дослідженнях такого типу, і знайдено зрозуміння й підтримку, що дає підставу сподіватися на їхню участь при належному розвитку подій.

На сьогодні можливі два варіанти подальшого розвитку співробітництва. При першому у створенні угруповання з трьох мікросупутників братимуть участь ще дві країни, при цьому Україна і кожна з інших країн готуватимуть свій мікросупутник з узгодженням КНА. При другому варіанті, що видається ефективнішим, кожна з країн-учасниць робить окремий прилад (або прилади) для всіх трьох мікросупутників і таким чином досягається і найкращий рівень КНА, оскільки кожний учасник робитиме ті прилади, які вміс найкраще. Крім того, повна тотожність параметрів КНА всіх трьох мікросупутників є важливою для розв'язання задачі пеленгації джерел ЕМ-випромінювань. В обох варіантах передбачається запуск всього угруповання українською ракетою.

На час подання даної роботи експеримент «Юносатс» введено в проект Національної космічної програми України на 2007–2011 рр. У випадку затвердження Програми в найближчий час можна сподіватися на реалізацію експерименту за таким графіком:

- 2007 — ухвалення рішення, розилання запрошень, ескізний проект (фаза А);
- 2008–2009 — розробка й виготовлення приладів, автономні випробування (фаза Б);
- 2010 — складання, комплексні випробування й запуск (фаза В).

Ця робота виконана при частковій підтримці Національного космічного агентства України, контракти № 1-02/03, 1-05/03 та Національної академії наук України в рамках цільової наукової програми «Розробка теорії, методів та інформаційних технологій комплексного вивчення сонячно-земних зв’язків як основи прогнозування космічної погоди» (пп. 10, 11) та гранта CRDF UKP2-2644-KV-05 «Турбулентність плазми в магнітосферних струмових системах».

1. Альперт Я. Л. Волны и искусственные тела в приземной плазме. — М.: Наука. 1974.—214 с.
2. Бучаченко Ф. Л., Ораевский В. Н., Похоторов О. А. и

- др. Іоносферні предвестники землетрясень // Успіхи фіз. наук.—1996.—**166**, вип. 9.—С. 1023—1029.
3. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987.—271 с.
 4. Дзюбенко Н. И., Ивченко В. Н., Козак Л. В. Изменения температуры в термосфере над очагами землетрясений по спутниковым измерениям // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—**43**, № 1.—С. 126—131.
 5. Івченко В. М., Козак Л. В., Венедиков Ю. І. та ін. Проект «Геокосмос» для українського молодіжного супутника // Космічна наука і технологія.—2004.—**10**, № 5/6.—С. 17—21.
 6. Корепанов В. Е., Негода А. А., Івченко В. Н. и др. Космический научный эксперимент «Вариант» на борту ИСЗ «Січ-1М» // Сб. тр. Первой укр. конф. по перспективным космическим исследованиям (Киев, 8—10 октября 2001 г.). — Киев, 2001.—С. 51—58.
 7. Корепанов В., Михайлова Є., Ноздрачов М. Температурний режим на борту КА «Інтербол-1» // Космічна наука і технологія.—1999.—**5**, № 1.—С. 112—116.
 8. Корепанов В. Є., Литвиненко Л. М., Литвинов В. А. та ін. Електромагнітний полігон наземної підтримки супутників експериментів на Український антарктичній станції // Космічна наука і технологія.—2004.—**10**, № 2/3.—С. 74—80.
 9. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «ВАРИАНТ»: вимірювання електро-магнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «СІЧ-1М» // Космічна наука і технологія.—1999.—**5**, № 5/6.—С. 1—6.
 10. Липеровский В. А., Похотов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—304 с.
 11. Маров М. Я., Колесниченко А. В. Введение в планетную аэрономию. — М.: Наука, 1987.—456 с.
 12. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. — М.: Наука, 1985.—224 с.
 13. Научная программа проекта «Попередження»: отчет по НИР «Программа» / Радиоастрономический ин-т НАНУ. — Госконтракт НКАУ № 7-39/96. — Харьков, 1997.—184 с.
 14. Отчет по НИР «Радиофизическое подспутниковое зондирование ионосферы» (шифр «Перспектива-III»). — Харьков, 1998.—208 с.
 15. Проект «ИНТЕРБОЛ—Прогноз»: Техническое предложение. — Днепропетровск: НКАУ, ГКБ «Южное», 2002.—79 с.
 16. Российско-Украинский научно-прикладной проект «Интербол—Прогноз». Науч. программа с приложениями. — ИКИ РАН — ИКИ НКАУ — НАНУ, 2001.
 17. Сопрунюк П. М., Климов С. И., Корепанов В. Е. Электрические поля в космической плазме. — Киев: Наук. думка, 1994.—190 с.
 18. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоатомиздат, 1982.—136 с.
 19. Федоренко А. К., Лизунов Г. В., Роткель Х. Спутниковые наблюдения квазиволновых возмущений атмосфера на высотах области F, вызванных мощными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—**45**, № 3.—С. 403—410.
 20. Фролов О. С., Дудник О. В., Шевченко В. А та ін. Детектори і багатоканальна електроніка для супутників спектрометрів космічного випромінювання // Вісник КНУ. Сер. Фізико-математичні науки.—2001.—Вип. 3.—С. 479—487.
 21. Черногор Л. Ф. Енергетика процесів на Землі, в атмосфері і околосземном космосе в світі проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія.—1999.—**5**, № 1.—С. 38—47.
 22. Шувалов В. А., Приймак А. И., Резниченко Н. П. и др. Контактная диагностика ионосферной и лабораторной плазмы // Космічна наука і технологія.—2004.—**10**, № 2/3.—С. 3—15.
 23. Ямпольский Ю. М. Система подспутникового ионосферного зондирования // Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тезисов. — Киев, 2001.—С. 58.
 24. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия—2004.—**9**, № 2.—С. 130—151.
 25. Artru J., Longnonne P., Blanc E. Normal modes modeling of post-seismic ionospheric oscillations // Geophys. Res. Lett.—2001.—P. 697—700.
 26. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. — Tokyo, TERRAPUB, 1999.—996 p.
 27. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Yu. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // Radio Sci.—1995.—**30**, N 6.—P. 1739—1752.
 28. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. — Tokyo, TERRAPUB, 1994.
 29. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. and Terr. Phys.—1975.—37.—P. 1011—1054.
 30. Galperin Yu. I., Hayakawa M. On the magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3 // J. Geomagn. and Geoelec.—1996.—**48**.—P. 1241—1263.
 31. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., et al. Frequency-and-angular HF sounding and VHF ISR diagnostics of TIDs // Radio Sci.—2003.—**38**, N 6.—P. 1102.
 32. Georges T. M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // J. Atmos. and Terr. Phys.—1968.—**30**.—P. 735—746.
 33. Hines C. O. The upper atmosphere in motion. — Washington, D. C.: American Geophys. Union, 1974.
 34. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophys.—1996.—**14**.—P. 917—940.
 35. Huang Y. N., Cheng K., Chen S. W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system // Radio Sci.—1985.—**20**.—P. 897—906.
 36. Jacobson, A. R., Carlos R. C. Observations of acoustic-

- gravity waves in the thermosphere following Space Shuttle ascents // *J. Atmos. Terr. Phys.*—1994.—**56**.—P. 525—528.
37. Korepanov V. Study of electromagnetic precursors in ionosphere (WARNING Project) // *Phys. Chem. Earth*.—1998.—**23**, N 9–10.—P. 969—973.
38. Korepanov V., Klimov S., Belyayev S., et al., International Space Station: study of near-surface environment // *57th International astronautical congress* (Valencia, Spain, October, 2–6, 2006). — 2006.—CD publ.—IAC 06-B4.3.09.
39. Korepanov V., Krasnosselskikh V., Lizunov G., et al. Experiment variant onboard Ukrainian satellite Sich-1M — first results // Abstracts of the 36th COSPAR Scientific Assembly (Beijing, China, July 16—23, 2006). — 2006.—CD publ.—COSPAR2006-A-00628 (PSW1-0034-06),
40. Korepanov V., Negoda O., Lizunov G., et al. Project Variant: current and field measurements on board Sich-1M satellite // *Adv. Space Res.*—2000.—**25**, N 7–8.—P. 1337—1342.
41. Kramer H. J. Observation of the Earth and its environment. Survey of missions and sensors. — Berlin, New York: Springer, 2002.—1982 p.
42. Kushida Yo., Kushida R. Possibility of earthquake forecast by ground observation in the VLF band // *J. Atmos. Electricity*.—2002.—**22**, N 3.—P. 239—255.
43. Lizunov G., Hayakawa M. Atmospheric gravity waves and their role in lithosphere-troposphere-ionosphere interaction // *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*.—2004.—**124**, N 12.—P. 1109—1120.
44. Manzini E., Hamilton K. Middle atmospheric traveling waves forced by latent and convective heating // *J. Atmos. Sci.*—1993.—**50**.—P. 2180—2200.
45. National space weather program. Strategic plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. — Washington, August 1995.
46. Pfister L., Chan K. R., Bui T. P., et al. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: a case study // *J. Geophys. Res.*—1993.—**98**.—P. 8611—8638.
47. Rice C. J., Sharp L. R. Neutral atmospheric waves in the thermosphere and tropospheric weather systems // *Geophys. Res. Lett.*—1977.—**4**, N 8.—P. 315—318.
48. Rishbeth, H., Garriot O. K. Introduction to ionospheric physics. — New York: Academic, 1969.—331 p.
49. Roberts, D. H., Klobuchar J. A., Fougere P. F., Hendrickson D. H. Large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980 explosion of Mount St. Helene // *J. Geophys. Res.*—1982.—**87**.—P. 6291—6301.
50. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., et al. Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment // *Ann. Geophys.*—2004.—Suppl. **47**, N 2/3.—P. 1215—1226.
51. Sauli P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—2001.—**63**.—P. 945—950.
52. Seismo electromagnetics: lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling / Ed. by M. Hayakawa and O. A. Molchanov. — Tokyo, TERRAPUB, 2002.—477 p.
53. Vaïsberg O. On the determination of the spatial scale in the moving reference frame // *Sov. J. Space Res.*—1985.—**12**, N 6.—P. 1241.
54. Varshavskiy I. I., Kalikhman A. D. Ionospheric effects of ground industrial explosions // *Geomagn. Aeron.*—1984.—**24**.—P. 211—216.
55. Withbroe G. L. Living with star. Space weather. — Washington, D.C., American Geophys. Union, 2001.—P. 45—51.—(Geophysical Monograph 125).
-
- ## THE IONOSPHERIC SATELLITE CLUSTER IONOSATS
- V. M. Ivchenko, V. Ye. Korepanov, G. V. Lizunov,
O. P. Fedorov, Yu. M. Yampolsky*
- Some proposals for the IONOSATS ionosphere space project, its scientific goals, onboard instruments and possibility of realization are presented. We propose to construct a space system for the long-term spatial-temporal monitoring of the main field and plasma parameters of the ionosphere for further development of fundamental conceptions of solar-terrestrial connections physics, nowcasting and forecast of Space Weather (SW) and diagnostics of natural and technogenic hazards using a cluster of three LEO microsatellites. The main project tasks are the following. 1. Scientific and methodological elaboration of the efficiency of the use of LEO satellites for SW monitoring, corresponding technological realization development and tests. 2. Systematic study of the dynamic response of the ionosphere to influences «from above» (solar and geomagnetic activity) and «from below» (meteorological, seismic and technologic processes). 3. Spatial-temporal monitoring of ionospheric disturbances with the aim to extract the signatures of natural and technogenic catastrophic events in the lower atmosphere and at the Earth's surface. 4. Synchronous operation of the existing sub-satellite electromagnetic and meteorological polygons. 5. Calibration of modern prognostic models of quiet and disturbed ionosphere. The IONOSATS project is proposed by the National Space Agency of Ukraine for the First European Space Program and for the Space Weather Program as a part of Global Monitoring for Environment and Security (GMES).

УДК 523.9

М. И. Стодилка

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. І. Франка, Львів

О природе пятиминутных колебаний яркости Солнца

Надійшла до редакції 26.04.06

Розглядаються можлива природа і походження п'ятихвилинних осциляцій яскравості Сонця. За спостереженнями Сонця (ДИФОС-Ф, VIRGO SPM, VTT-лінія λ 532.418 нм Fe I з високим просторовим розділенням) шляхом розв'язування інверсної задачі перенесення випромінювання відтворено висотну стратифікацію як глобальних коливань низких порядків l , так і локальних коливань температури у фотосфері Сонця. Із фотосферних коливань виділено псевдоглобальні коливання температури, що дозволило дослідити вклад акустичних і внутрішніх гравітаційних мод у коливання яскравості Сонця. Показано, що останні виникають, скоріш за все, у результаті розсіяння p -мод низких порядків на сонячних гранулах з наступною конструктивною інтерференцією.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения излучения Солнца как звезды показывают наличие колебаний не только скорости, но и яркости. Последние были впервые выявлены во время эксперимента ACRIM на спутнике SMM [39], позже во время миссии PHOBOS (эксперимент IPHIR [10]), а также во время недавних экспериментов на сателлитах CORONAS и SOHO. Несмотря на значительный атмосферный шум, вариации излучения Солнца наблюдаются и в наземных условиях.

Глобальные (резонансные) пятиминутные осцилляции скорости движения вещества на поверхности Солнца представляют собой акустические p -моды разного порядка l [1], которые описываются сферическими гармониками; каждой сферической гармонике отвечает дискретный набор собственных частот колебаний с разным распределением амплитуд. По наблюдениям на космическом аппарате SMM выявлены пятиминутные вариации солнечной постоянной с амплитудой порядка нескольких миллионных долей светимости Солнца [39]. Наблюдаемым

флуктуациям яркости (в разных участках непрерывного спектра) отвечают колебания температуры 3 К [39]. Результаты наблюдений флуктуаций излучения Солнца с помощью прибора ДИФОС во время первой короткой миссии CORONAS приведены в работах [20, 12]: с помощью фурье- и вейвлет-анализа временных рядов отождествлены моды глобальных колебаний, их тонкая структура.

В работе [31] по наблюдениям солнечной поверхности $5'' \times 5''$ в линии калія λ 769.9 нм исследовали 5-минутные осцилляции температуры и скорости; в высотном распределении колебаний температуры выявлено два узла, где фаза резко изменяется на 180° . Поскольку наблюдаемая область незначительна, то полученные результаты отображают, по-видимому, результат наложения локальных осцилляций на глобальные.

Сейчас преобладает мнение о том, что солнечные p -моды возбуждаются стохастически турбулентной конвекцией в подфотосферных слоях. Результаты численного моделирования [23, 34] подтверждают модель стохастического возбуж-

дения осцилляций. Следствием такой модели возбуждения осцилляций есть гипотеза о наличии дискретных источников, от которых распространяются колебания.

Согласно [23, 34] основным источником возбуждения осцилляций являются стохастические неадиабатические флуктуации давления вблизи поверхности. Так как последние наиболее сильные в межгранулярных слоях и на краях гранул, то именно в этих местах возбуждение осцилляций наиболее эффективное. Из работы [37] следует, что солнечные осцилляции возбуждаются скорее всего за счет быстрого охлаждения вещества при образовании нисходящих потоков в межгранулярных слоях.

В настоящее время, несмотря на незначительное число публикаций, утверждается также гипотеза о том, что наблюдаемые акустические события могут быть вызваны модуляцией волн неоднородностями солнечной атмосферы [18, 35, 40].

Глобальные p -моды чувствительны к неоднородностям среды, в которой они распространяются: так, в активных областях энергия и продолжительность этих мод уменьшается почти вдвое [19], при распространении p -мод малых порядков сквозь солнечную грануляцию осуществляется деформация их волновых фронтов, которая усиливается полем конвективных скоростей [19, 42].

Наблюдения четко показывают взаимосвязь между грануляцией и p -модами [9, 15]. Кроме того, в атмосфере Солнца из-за флуктуаций плотности вещества генерируются атмосферные гравитационные волны [32]. Следовательно, как p -, так и g -моды (порожденные разными источниками) могут давать вклад в глобальные колебания яркости Солнца вследствие их конструктивной интерференции.

Как видим, происхождение солнечных осцилляций все еще точно не установлено. Механизм их генерации не определен, а сам вопрос о природе колебаний остается открытым.

В настоящей работе представлены результаты исследования глобальных колебаний яркости Солнца инверсными методами, которые дают высотное распределение термодинамических параметров и скоростей модели; в качестве экспериментальных данных использованы результаты наблюдений временных вариаций излучения как

всего Солнца, так и небольшого участка в центре диска. Высотное распределение воспроизведенных фотосферных колебаний представляет собой ценную информацию для исследования природы пятиминутных осцилляций яркости, механизма их возбуждения.

Так как непрерывное излучение зарождается в фотосферных слоях Солнца, то исследование вариаций яркости Солнца инверсными методами позволяет изучать глобальные температурные возмущения в этих слоях. Кроме того, пространственные масштабы грануляции соизмеримы с длинами волн акустических пятиминутных колебаний, а значит, предоставляется возможность исследовать рассеяние глобальных p -мод низких порядков на грануляционной структуре атмосферы.

Изучение глобальных фотосферных колебаний Солнца дает ответ о природе пятиминутных осцилляций, механизмах их возбуждения; изучение температурных вариаций в фотосфере Солнца тесно связано с проблемой вариаций глобальных характеристик Солнца — его светимости и радиуса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В этом исследовании мы сделали обработку данных со спектрофотометром VIRGO (SPM), размещенного на космической обсерватории SOHO (<http://sohodata.nascom.nasa.gov>). Спектрофотометр имеет три спектральные диапазона: 862 нм, 500 нм и 402 нм, точность измерений 10^{-6} от полной интенсивности излучения Солнца, временная дискретность отсчета 60 с.

Одним из приборов, размещенных на платформе спутника CORONAS-F, является спектрофотометр ДИФОС-Ф, сконструированный для измерения флуктуаций солнечного излучения в интегральном спектре в шести спектральных участках ($\lambda = 350, 500, 650, 850, 1100, 1500$ нм) с шириной полосы пропускания 10—20 % от центральной длины волны; временная разрешающая способность 35.55 с; относительная разрешающая способность по интенсивности также составляет одну миллионную от полной интенсивности излучения Солнца.

Данные ДИФОС позволяют изучать p - и g -моды собственных колебаний Солнца.

Возмущение параметров неоднородной атмосферы Солнца (температура, поле скоростей) воспроизведены по профилям линии Fe I $\lambda 523.418$ нм в центре диска Солнца с высоким пространственным и временными разрешением. Наблюдения сделаны на Немецком вакуумном телескопе на Канарских островах Н. Г. Щукиной; временная разрешающая способность — 9.3 с, пространственная — около 0.5" [17].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим воспроизведение вариаций параметров модели атмосферы Солнца путем решения инверсной задачи переноса излучения. Глобальные возмущения колебаний низких порядков можно получить по флуктуациям излучения Солнца в разных спектральных диапазонах (прибор ДИФОС-Ф на КОРОНАС-Ф, прибор VIRGO SPM на SOHO).

Атмосферу Солнца рассматриваем в рамках плоской геометрии. В атмосфере имеют место незначительные возмущения плотности, давления и температуры, которые связаны между собой уравнением газового состояния. Такая модуляция термодинамических параметров среды отображается на интенсивности излучения, которое проходит через атмосферу. Вследствие чего возникают незначительные флуктуации излучения, расшифровка которых позволяет получать информацию о глобальных процессах в атмосфере звезды.

Если x — вектор, который задает стратификацию параметров по глубине атмосферы, а δx описывает их вариации, то уравнение переноса для вариации излучения имеет вид [30]

$$\frac{d\delta I}{dt} = \delta I - \delta S^{ef},$$

$$\delta S^{ef} = S \frac{\delta \eta}{\eta} - I \frac{\delta \chi}{\chi},$$

где η — коэффициент излучения, χ — коэффициент поглощения, S — функция источников. Для излучения в непрерывном спектре (оно зарождается в нижних слоях фотосфера) $S = B$. Таким образом, если известны вариации параметров среды, легко получить вариации потока излучения с поверхности звезды путем решения уравнения переноса.

Для нахождения вариаций параметров среды введем целевую функцию:

$$\chi^2 = \chi_0^2 + \alpha S, \quad (1)$$

где χ_0^2 — определяется несовпадением наблюденных и теоретических потоков излучения по всем спектральным диапазонам, S — тихоновский стабилизатор, он позволяет получать решения из класса гладких функций, α — регуляризующий множитель.

Вариации δx параметров находим с помощью соотношения, полученного путем линеаризации целевой функции. Имея δx , уточняем возмущение $\Delta x = \Delta x_0 + \delta x$, по новым Δx рассчитываем вариации потоков излучения, а по ним получаем новые δx и Δx до тех пор, пока не выполнится условие сходимости итерационной процедуры. Для повышения сходимости мы использовали схему Левенберга—Марквардта [24]. Глобальные вариации воспроизводились в рамках модели спокойного Солнца VAL80C.

Пространственно-временные вариации параметров (температура, поле скоростей) неоднородной атмосферы Солнца воспроизведены по профилям линии Fe I $\lambda 523.418$ нм в центре диска с высоким пространственным и временными разрешением.

Возмущения, вызванные конвективными и волновыми (локальные + резонансные) движениями, уже соизмеримы со значениями параметров невозмущенной среды. Методика воспроизведения возмущений аналогична описанной выше, но гораздо сложнее. В выражении (1) χ_0^2 определяется несовпадением экспериментальных и теоретических профилей рассматриваемых линий. По профилям вдоль щели спектрографа мы рассчитываем набор полуэмпирических моделей вдоль пространственной координаты X на поверхности Солнца. Таким образом, получается двумерная модель неоднородной атмосферы Солнца вдоль двух пространственных координат X, h (h — высота) и времени.

Профили линии Fe I $\lambda 523.418$ нм представляют возможность определять параметры модели от слоев образования континуумов до области температурного минимума. Так как в верхних слоях атмосферы Солнца существенны эффекты отклонения от ЛТР, мы решаем неравновесную инверсную задачу переноса излучения: в рамках каждой промежуточной модели, которая итера-

ционно уточняется, путем совместного решения уравнения переноса и статистического равновесия находим не ЛТР-коэффициенты, которые затем используем в инверсной процедуре.

Нельзя не отметить важной роли стабилизаторов Тихонова в инверсной задаче переноса излучения:

- а) решения получаются гладкими;
- б) существенно уменьшаются ложные осцилляции решений;
- в) решения слабо зависят от стартовых значений воспроизводимых параметров;
- г) в случае неравновесной задачи осуществляется быстрая сходимость итерационной процедуры; при отсутствии стабилизаторов сходимость очень медленная или отсутствует вообще.

Наш инверсный код описан в работах [5, 6].

После обработки всех профилей инверсной процедурой мы получили данные о температуре и поле скоростей, что позволяет изучать динамику неоднородной структуры атмосферы Солнца. В нашем исследовании мы ограничились только температурой; массив ее данных будем представлять в виде трехмерной матрицы T_{kij} , где индекс k — отвечает за время (время наблюдения — 31 мин), i — за пространственную координату (длина наблюдаемого участка 64 Мм) вдоль поверхности Солнца, j — за высоту атмосферы Солнца (линия λ Fe I позволяет воспроизводить физические условия на высотах $-75 \text{ км} \leq h \leq 550 \text{ км}$).

Температурная структура фотосферы Солнца определяется как волновыми, так и конвективными движениями. Спектральные особенности вариаций излучения Солнца позволяют разделить их на конвективную и волновую составляющие [17, 25]. Многомерное преобразование Фурье пространственно-временных вариаций позволяет с помощью линий ($\omega = v_s \cdot k_x$) или гиперконуса Лемба ($\omega^2 = v_s^2 \cdot (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$, где v_s — скорость звука), выделить соответствующую составную. Действительно, области фурье-образа $\omega \geq v_s \cdot k_x$ отвечают звуковые колебания, а области $\omega < v_s \cdot k_x$ — внутренние гравитационные волны и конвективные движения. Конвективные движения можно выделить аналогично: $\omega < v_{conv} \cdot k_z$ или $\omega^2 < v_{conv}^2 \cdot (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$, где v_{conv} — максимальная (наблюданная или воспроизведенная) скорость конвективных движений. Применив к соответственно выделенной части

фурье-образа обратное преобразование Фурье, легко получить пространственно-временные вариации исследуемых величин, вызванных гравитационными волнами и конвективными движениями или чисто конвективными движениями. Однако в нашем случае $\Delta z = 25 \text{ км}$, $\Delta X = 378 \text{ км}$, вследствие чего $\Delta k_x \ll \Delta k_z$, поэтому конвективные движения выделяли следующим образом: $\omega < v' \cdot k_x$, где $v' \approx 1...2 \text{ км/с}$, $k_x = 2\pi n/(N\Delta X)$, $N = 170$, $n = -N/2, ..., N/2$.

Применение узкополосных фильтров позволяет изучать особенности зарождения и распространения пятиминутных, низкочастотных и высокочастотных колебаний в атмосфере Солнца.

Чтобы выяснить природу глобальных пятиминутных осцилляций солнечного излучения, мы исследовали вклад акустических и внутренних гравитационных мод в колебания яркости Солнца. Для этого мы воспроизвели:

- а) глобальные вариации температуры в фотосфере Солнца (по результатам наблюдений ДИФОС и SOHO);
- б) пространственно-временные вариации температуры и скоростей на масштабах грануляции, порожденные как p - и g -модами, так и конвективными движениями (по профилям линий нейтрального железа с высоким пространственным разрешением);
- в) выделили из воспроизведенных пространственно-временных вариаций температуры (наблюдения VTT) глобальные фотосферные p - и g -колебания излучения Солнца низких порядков.

КОЛЕБАНИЯ ЯРКОСТИ СОЛНЦА И ГЛОБАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ФОТОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Поскольку непрерывное излучение зарождается на разных глубинах в атмосфере Солнца, то мы имеем возможность изучать распространение глобальных колебаний низких l в фотосфере Солнца (по крайней мере в нижней фотосфере). Эта область атмосферы интересна еще и тем, что в ней находится сверхадиабатический слой со слабоэффективной конвекцией и начало области проникающей конвекции, где изменяется классическое поведение грануляции. Солнечная конвекция на масштабах грануляции представ-

ляет собой систему восходящих и нисходящих конвективных потоков, причем шкала флюктуаций температуры и скорости порядка длины волны акустических пятиминутных осцилляций в солнечной атмосфере. А следовательно, эти колебания рассеиваются на грануляционной структуре атмосферы. К тому же конвективные движения на масштабах солнечной грануляции приводят не только к частотным сдвигам, но и к искривлению волновых фронтов горизонтальной структурой, в результате чего возникают моды, распространяющиеся почти горизонтально [41, 42]; наложение этих волн приводит к пространственной модуляции колебаний. Такой модуляцией можно объяснить, в частности, отличие колебаний над гранулами и межгранулами [17, 18, 41]. Наблюдения также четко показывают взаимосвязь между грануляцией и p -модами [9, 15].

В работе [42] рассмотрено влияние конвекции на глобальные осцилляции в рамках периодической двухпотоковой модели горячих (восходящих) и холодных (нисходящих) потоков; показано, что в результате деформации волновых фронтов горизонтальной структурой возникают высокочастотные моды с более-менее горизонтальным распространением, наложение которых приводит к пространственной модуляции колебаний. Исследования распространения волн путем моделирования указывают на весомое влияние грануляционной структуры на распространение как локальных, так и глобальных колебаний в солнечной атмосфере.

В реальных условиях солнечной грануляции при моделировании тяжело учесть все факторы и особенности распространения волн, поэтому интересными являются результаты исследования осцилляций Солнца инверсными методами.

При исследовании глобальных колебаний низких порядков l необходимо проводить наблюдения как можно большей поверхности. Ниже представлены результаты исследования колебаний Солнца по наблюдениям в непрерывном спектре и в линии нейтрального железа. Важно заметить, что результаты наблюдений в непрерывном спектре не зависят от поля скоростей в атмосфере и от вращения звезды.

Глобальные колебания температуры (данные SOHO). При обработке данных с SOHO использовались 24-часовые ряды наблюдений.

Согласно [17] максимум флюктуаций излучения Солнца, порожденных звуковыми волнами, лежит в области 5-мин колебаний. Для исследования именно этих колебаний мы отфильтровали временные ряды с помощью фильтра Ланцоша [8] с заостренной характеристикой (фильтр нерекурсивен и симметричен; фазовых сдвигов не делает), вырезав таким образом низкие и высокие частоты за исключением области периодов от трех до десяти минут.

По выделенным таким образом колебаниям мы воспроизвели путем решения инверсной задачи переноса излучения высотные вариации термодинамических параметров модели солнечной атмосферы.

Полученные флюктуации температуры показаны на рис. 1; колебания, которым отвечают разные моменты времени, наложены друг на друга, и в результате получаем глобальную стоячую волну в фотосфере Солнца (в нашем математическом аппарате колебания не заложены). На краях показанного интервала высот ошибка воспроизведения составляет 20%; минимальная ошибка 5% отвечает высотам $h = -25\ldots 25$ км/с.

Амплитуда колебаний увеличивается в верхних слоях. На фотосферные слои приходится два узла ($h \approx -40$ км, $h \approx 100\ldots 110$ км) и одна пучность при $h \approx 30$ км. В узлах фаза колебаний изменяется на π . За счет погрешностей воссоздания возникает размывание положения узлов; упомянутое размывание может быть

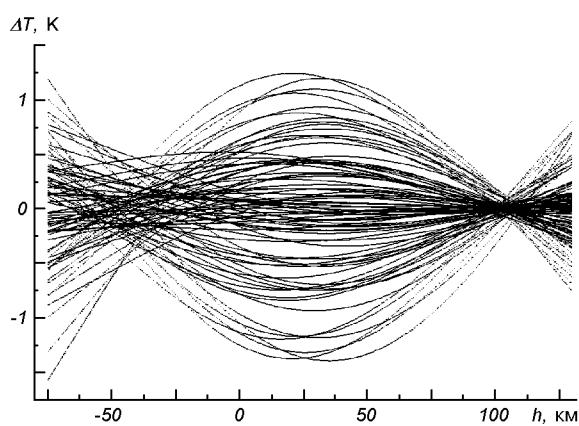


Рис. 1. Воспроизведенные глобальные колебания температуры в фотосфере Солнца (адиабатическое приближение) по данным эксперимента SOHO VIRGO/SPM

обусловлено также колебаниями других мод. Поскольку погрешность воссоздания в высших слоях увеличивается, мы не можем определить положения второй пучности. Но ясно одно — колебания яркости Солнца порождены глобальными стоячими волнами в его фотосфере. Такие колебания являются модами, которые возникают при распространении глобальных p -мод с малыми порядками l через неоднородную (грануляция) атмосферу Солнца. Действительно, при распространении p -мод с малыми l через солнечную грануляцию происходит деформация волновых фронтов. При прохождении вверх рассеяние волн на температурных неоднородностях усиливается полем конвективных скоростей [42], в результате чего рассеянные волны сильно отклоняются от вертикали (по мере отклонения от вертикали влияние конвективных потоков уменьшается) и захватываются соответствующим фотосферным слоем — звуковым резонатором. Захваченные колебания распространяются почти горизонтально. Верхняя граница резонатора определяется частотой среза (но нужно учитывать тоннельный эффект при распространении волн), нижняя — точкой поворота. На нижней и верхней границах происходит отражение волн внутрь резонатора, что приводит к образованию стоячих волн (через наложение волн, которые распространяются в противоположные стороны); вследствие этого в фотосфере Солнца возникают глобальные колебания излучения. К сожалению, интервал воспроизведимых высот не охватывает границ резонатора.

Очевидно, конвективные потоки имеют наибольшее влияние на моды, распространяющиеся вертикально ($l = 0$) [4], а горизонтальная составляющая конвективных потоков влияет на нерадиальные моды, которые имеют наклонное направление распространения. Наблюдения в интегральном спектре не позволяют изучать не-рассеянные акустические колебания, распространяющиеся почти вертикально, так как их высотная динамика охватывает большие масштабы; соответствующие исследования требуют более широких интервалов глубин в солнечной атмосфере.

Напомним, что исследование фотосферных колебаний в линии K1 также указывают на наличие узлов в колебаниях температуры. В работах [14, 16] считается, что фотосферные пятими-

нутные колебания являются преимущественно глобальными и скорее всего нечувствительными к локальной тонкой структуре. Отметим, что резкое увеличение амплитуды колебаний в нижних слоях (согласно [31] 130 К при $I_{gt} = 0.6$) порождено скорее всего «самовозбуждением» инверсного кода; так что наиболее достоверная амплитуда колебаний в нижней фотосфере равна 20 К, а в нашем случае она меньше и составляет приблизительно 1.5 К, поскольку использованы данные наблюдений всего диска Солнца. Согласно [39] наблюдаемым вариациям интенсивности излучения отвечают колебания температуры ± 3 К.

Расчет флуктуаций в неадиабатическом приближении дает подобные результаты, правда, уменьшается увеличение амплитуды колебаний температуры в верхних фотосферных слоях.

Среди глобальных пятиминутных осцилляций бегущие волны, которые подогревают хромосферу, в нашем исследовании не прослеживаются.

Таким образом, пятиминутные осцилляции потока излучения Солнца обусловлены суперпозицией отдельных стоячих волн, захваченных звуковым резонатором. Отметим также, что при воспроизведении возмущений температуры мы учитывали вариации непрозрачности (непрозрачность зависит в том числе от температуры, концентрации электронов и атомов водорода), которые приводят к смещению области образования излучения; мы учли также вклад металлов и отрицательных ионов водорода в УФ-области в коэффициент поглощения (пакет ОРАСИТ Н. Г. Щукиной).

Использование результатов наблюдений с большим числом спектральных диапазонов и наблюдения в линиях позволяют воспроизвести картину колебаний в более высоких слоях атмосферы Солнца.

Исследование глобальных колебаний температуры по данным ДИФОС-Ф. Поскольку период вращения спутника равен 95 мин, то концы таких временных интервалов засорены отраженными сигналами от Земли, что вызывает существенные всплески исследуемого сигнала, особенно в ИК-каналах [2]. В результате вращения спутника вокруг Земли происходит изменение оптической толщины атмосферы. Это порождает низкочастотную модуляцию излучения Солнца. Для устранения такой модуляции

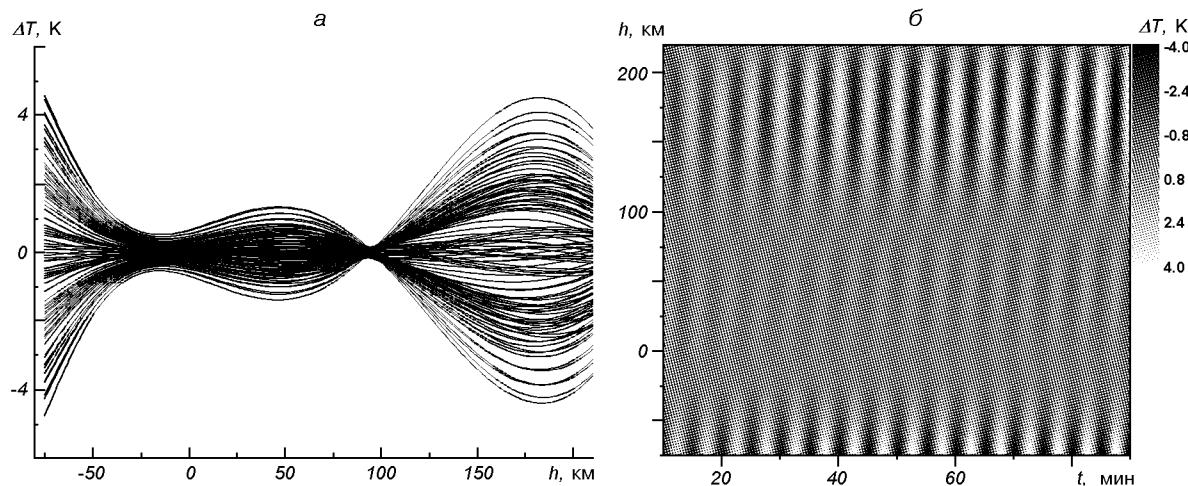


Рис. 2. Глобальные пятиминутные колебания температуры по данным ДИФОС-Ф: *а* — высотная стратификация, *б* — временная развертка колебаний

входные сигналы пропустили через фильтр, который вырезает долгопериодическую составляющую ($T > 20$ мин).

Поскольку временные вариации упомянутых всплесков попадают в диапазон исследуемых частот, мы ограничивались исследованием только центральных частей (длительностью около 50 мин) 95-минутных циклов витков наблюдений. Кроме этого, мы анализируем не абсолютное, а относительное значение сигнала, что исключает влияние поглощения земной атмосферой и изменение расстояния к Солнцу при движении спутника по орбите; к сожалению, мы не можем учесть рассеянных и отраженных сигналов.

Полученные таким образом временные ряды подавались на вход инверсного кода, который воспроизводит глобальную стратификацию вариаций температуры в фотосфере Солнца.

Возмущение температуры воспроизведено в рамках спокойной модели Солнца (VAL80C) в адиабатическом приближении. При исследовании мы вырезали узкие полосы частот, которым соответствуют разные периоды колебаний.

Воспроизведенная по пятиминутным колебаниям высотная стратификация температуры в разные моменты времени показана на рис. 2. Амплитуда колебаний с высотой увеличивается, правда, увеличивается и в нижних слоях: $h < -20$ км. Как видно, вариации температуры порождают в фотосфере Солнца глобальную стоячую волну. Учитывая высотную зависимость

погрешности воссоздания (погрешность незначительная на высотах -75 км $< h < 250$ км), мы можем определить положение узлов и пучностей температуры (рис. 2, *а*); временная развертка глобальных колебаний низких порядков l в двухмерном представлении изображена на рис. 2, *б*. Один из узлов при $h \approx 90\ldots100$ км попадает на начало области проникающей конвекции, и это может вызывать модуляцию амплитуды колебаний температуры именно в данной области. Но, как видно из рис. 2, *б*, в узле при $h \approx 90$ км фаза изменяется на 180° (что говорит в пользу существования стоячих волн), тогда как в нижнем узле ($h \approx -20$ км) изменение фазы близко к 180° лишь в начале интервала наблюдений рассматриваемого витка.

Пучности приходятся на 50 и 180 км. Поскольку в фотосфере Солнца есть стоячая волна, то падающая волна должна отражаться от слоев, что прилегают к температурному минимуму.

Кроме этого, речь идет об одновременном наложении волн по всему диску Солнца; следовательно, такие стоячие волны могут быть порождены прохождением колебаний низких порядков l через атмосферные слои Солнца.

Как известно, для стоячих волн расстояние между узлом и пучностью составляет $\lambda/4$ и равняется 600 км при $T = 5000$ К; в нашем случае это расстояние всего 90 км. Следовательно, полученная нами глобальная температурная структура, которая порождает вариации яркости

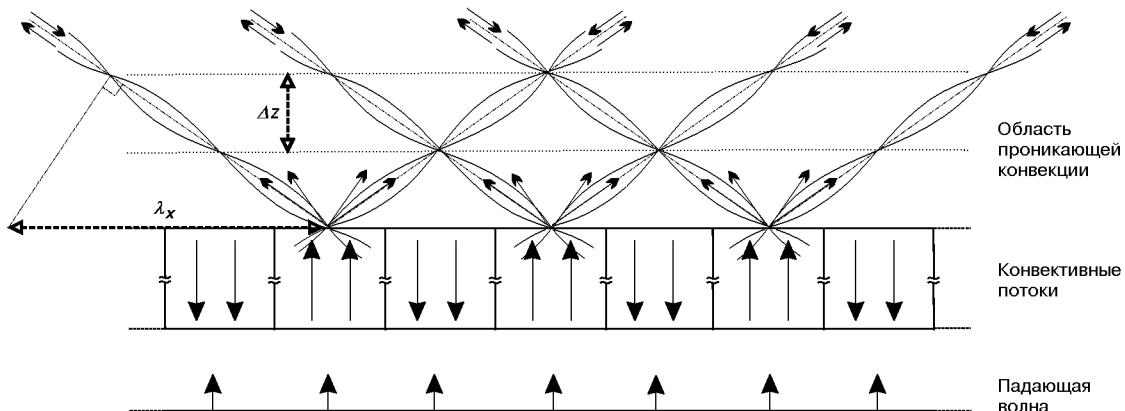


Рис. 3. Схема образования глобальных температурных вариаций

Солнца, может быть порождена прохождением волн, распространяющихся не вертикально, а под некоторым углом к горизонту. Образование таких стоячих волн показано схематически на рис. 3. При наклонном распространении волны λ_x превышает λ , но разность высот залегания соседних узлов (Δz на рис. 3) меньше $\lambda/2$.

Согласно наблюдениям [22] колебания в невозмущенной атмосфере происходят практически всюду и всегда, причем фаза колебаний сохраняется дольше, чем амплитуда. А отдельные цуги волн остаются когерентными на протяжении 20–40 Мм и в течение двух-трех десятков минут. Наше исследование профилей франгоферовых линий с высоким пространственным и времененным разрешением также выявляет цуги акустических волн, которые при выполнении определенных условий могут давать наблюдаемые вариации яркости Солнца (см. ниже).

Согласно результатам воспроизведения положение верхнего узла слабо зависит от частоты (1.5–5.5 мГц). Это может быть обусловлено залеганием узла в переходном слое от классической к проникающей конвекции. Действительно, при $h \approx 100$ км вариации температуры минимальны, а следовательно, являются минимальными вариации и волновой составной, которая соизмерима с конвективной составной [17]. В нижнем узле также имеет место значительное уменьшение вариаций температуры. Этот узел лежит в области вершины конвективной зоны [6], которая определяется критерием Шварцшильда [28]. У нас нет весомых аргументов,

чтобы утверждать, это узел или же результат модуляции температуры вершиной конвективной зоны. Размытие фазы колебаний в нижнем узле может быть обусловлено погрешностями воспроизведения, частичным отражением падающей волны от вершины конвективной зоны, или же отклонением от адиабатичности в условиях нижней фотосферы; в этих слоях долгопериодические колебания, скорее всего, изотермические.

Полученные данные для разных витков наблюдений (прибор ДИФОС) качественно совпадают.

Мы предлагаем следующий сценарий происхождения вариаций яркости Солнца: p -моды небольших порядков l рассеиваются на конвективных потоках солнечной грануляции. Рассеянные волны распространяются вверх и из-за воздействия конвективных потоков все более отклоняются от вертикального направления. Конструктивная интерференция таких волн дает наблюдаемые осцилляции Солнца.

Таким образом, рассмотренная выше стоячая волна возникает в результате наложения падающей и отраженной от верхних слоев волн (рис. 3). В верхних слоях конвективной зоны и в переходном слое к проникающей конвекции рассеяние волн на пространственных неоднородностях есть, по-видимому, наибольшим (большие скорости потоков, изменяется температурная структура грануляции). На это, в частности, указывает деформация волновых фронтов согласно результатам воспроизведения физиче-

ских условий по наблюдениям с высоким разрешением. Поэтому для волн, распространяющихся под разными углами к горизонту, влияние переходного слоя к проникающей конвекции на амплитуду колебаний (здесь температурные вариации минимальны) будет наименьшим лишь для таких волн, которые при наложении падающей и отраженной волн дают узел при $h \approx -90\ldots100$ км и, возможно, при $h \approx -20$ км; в противном случае волны будут подавлены. На наличие интерференции прямых (от источника) и отраженных волн указывает, в частности, наблюданная асимметрия профилей интенсивности и скорости [11]; эта асимметрия слабо зависит от l .

Согласно полученным результатам (рис. 2) узлы в некоторые моменты времени могут исчезать (один или оба), а затем появляться снова; они исчезают преимущественно во время уменьшения амплитуды колебаний яркости. Временные вариации глобальных p -мод были выявлены в работе [12].

Отметим, что в работе [21] рассмотрено влияние случайных конвективных потоков на осцилляции акустических частот. Численное моделирование обнаруживает усиление или затухание волн в зависимости от характеристического горизонтального размера потоков: гранулы размером около 0.2 Мм увеличивают амплитуду колебаний, тогда как гранулы 2 Мм дают обратный эффект. К сожалению, результаты моделирования применимы для высокочастотных акустических колебаний (больше 5—6 мГц).

Мы рассмотрели результаты воспроизведения глобальных осцилляций температуры в фотосфере Солнца в адиабатическом приближении, которое несправедливо для долгопериодических колебаний, а тем более в нижней фотосфере. Интересными являются результаты аналогичного исследования долгопериодических осцилляций в изотермическом приближении.

В то же время остается неясной природа колебаний, вызывающих 5-мин вариации яркости Солнца — являются ли они акустическими или атмосферными гравитационными волнами (которые могут генерироваться в слоях с интенсивными флюктуациями плотности, температуры вещества). Теоретические исследования указывают на дисторсию фронтов волн, проходящих через грануляционную структуру атмосфе-

ры Солнца, но из-за сложности задачи приходится делать ряд упрощений [41, 42]. С другой стороны, глобальные осцилляции Солнца налагаются на локальные (первичные колебания, которые непосредственно генерировались, рассеялись или отразились). Поэтому в данных, воспроизведенных по профилям высокого пространственного разрешения, должны иметься как локальные, так и глобальные колебания, которые можно легко выделить, например, путем пространственной фильтрации (в нашем случае фильтр сферических гармоник неприменим). Это позволит также уточнить моду колебаний (p или g), породивших колебания яркости Солнца.

ПРИРОДА ПЯТИМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЯРКОСТИ СОЛНЦА

Рассмотрим результаты воспроизведения волновых вариаций по профилям с высоким пространственным разрешением. Воспроизведение температурной структуры солнечной грануляции рассмотрено в работе [6]. По методике, описанной выше, была выделена волновая составная, которой соответствуют акустические моды колебаний. На рис. 4 представлена воспроизведенная в фиксированый момент времени структура пяти- и десятиминутных колебаний с одинаковой узкой полосой пропускания (0.5 мин), проекция скорости распространения возбуждения на щель наблюдения не меньше скорости звука; светлые полоски соответствуют участкам с повышенной, а темные — с пониженней температурой.

Исследование динамики волновых процессов показывает, что волны распространяются преимущественно почти горизонтально. Амплитуда колебаний увеличивается в верхних, а также в нижних слоях атмосферы.

Несмотря на увеличение амплитуды с высотой, на высотах $-20 \text{ км} < h < 100 \text{ км}$ колебания подавлены. Очевидно, это происходит из-за дисторсии волновых фронтов (искажения волновых фронтов более отчетливо проявляются для пятиминутных колебаний (рис. 4, a)), а также за счет радиационного слаживания температурных возмущений (здесь $\tau \approx 1$). Для десятиминутных колебаний также имеет место рассеяние, но оно менее эффективно, так как длина волны

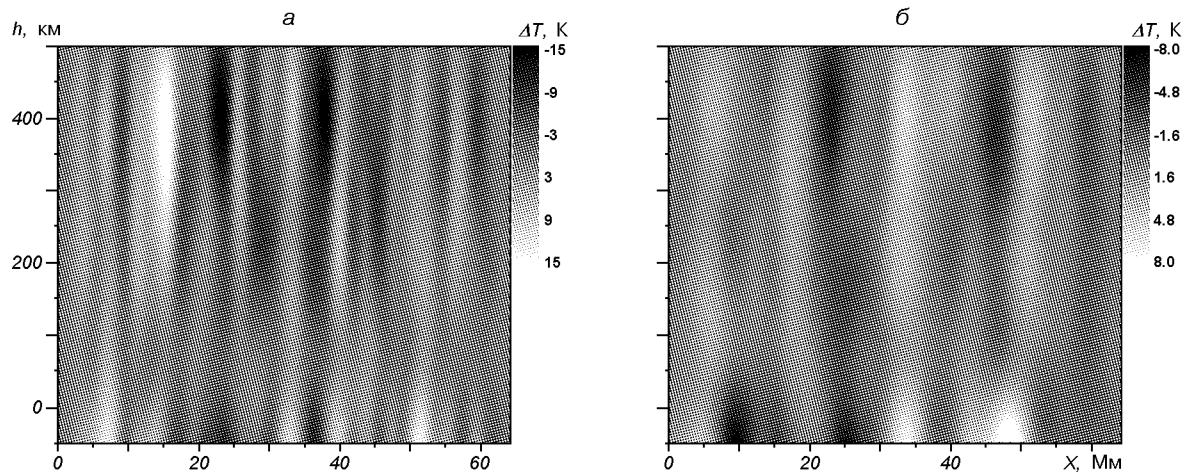


Рис. 4. Структура акустических колебаний, воспроизведенная по профилям с высоким пространственным разрешением (данные VTT): *а* — 5-мин, *б* 10-мин колебания

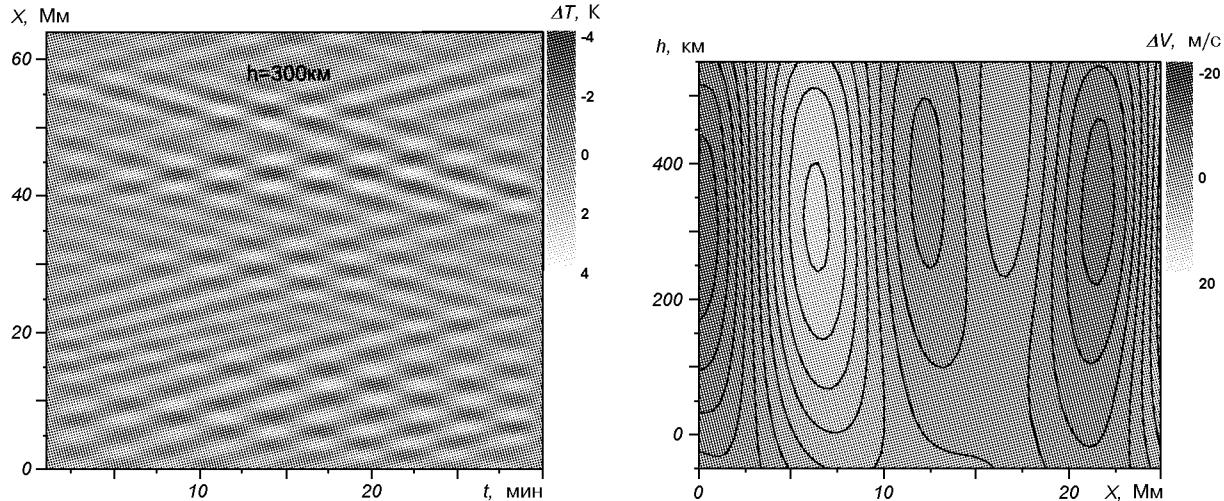


Рис. 5. Пространственно-временные вариации температуры в средней фотосфере (5-минутные акустические волны с почти горизонтальным распространением)

Рис. 6. Структура акустических волн в области отражения от верхних слоев

этих колебаний больше размеров неоднородностей, и волны частично огибают их. На грануляционной структуре будет происходить рассеяние и глобальных колебаний низких порядков l , вследствие чего возникают моды, распространяющиеся почти горизонтально [42].

На рис. 5 изображена динамика развития волновых движений в средней фотосфере на высоте 300 км. Мы выделили волны, распространяющиеся со скоростью $V_{p,x} = 10 \dots 15$ км/с, т. е. почти горизонтально. Выделенные волновые движения представляют собой наборы волновых

цугов, распространяющихся в противоположные стороны. Встречаются волны, амплитуда которых слабо изменяется во времени. Время некоторых цугов порядка времени наблюдения (31 мин). При выполнении определенных фазовых соотношений распространяющиеся в противоположные стороны цуги дают конструктивную интерференцию, а согласно рис. 5 такие соотношения выполняются довольно часто.

Но все же существуют волны, распространяющиеся в верхние слои атмосферы, однако амплитуда таких колебаний малая. Последнее обстоя-

тельство не является препятствием для их детектирования. В самом деле, для волн, распространяющихся преимущественно вверх, существенно увеличивается проекция амплитуды колебаний скорости ΔV_z , при этом резко увеличивается проекция фазовой скорости $V_{p,h}$, причем $V_{p,h} > V_p$. Последнее обстоятельство мы использовали для обнаружения акустических волн, распространяющихся в верхние слои атмосферы.

На рис. 6 показаны результаты фильтрации акустических волн, проекция фазовой скорости которых значительно превышает скорость звука: $V_{p,x} = 40 \dots 60$ км/с; эти волны распространяются под углом 25—30° к нормали (оценка сделана по

наклону волнового фронта). А на участке $X = 10 \dots 20$ Мм происходит резкое изменение направления распространения волн с последующим отражением вниз: первая полуволна на этом участке идет вверх, вторая — вниз (из-за резкого увеличения $V_{p,x}$ амплитуда колебаний этих полуволн подавлена и самой фильтрацией). К сожалению, мы не можем определить положение слоя, отражающего пятиминутные колебания, так как чувствительность выбранной линии железа к вариациям термодинамических и кинематических параметров модели атмосферы резко уменьшается при $h > 550$ км, но можно утверждать, что отражающий слой залегает не ниже температурного минимума.

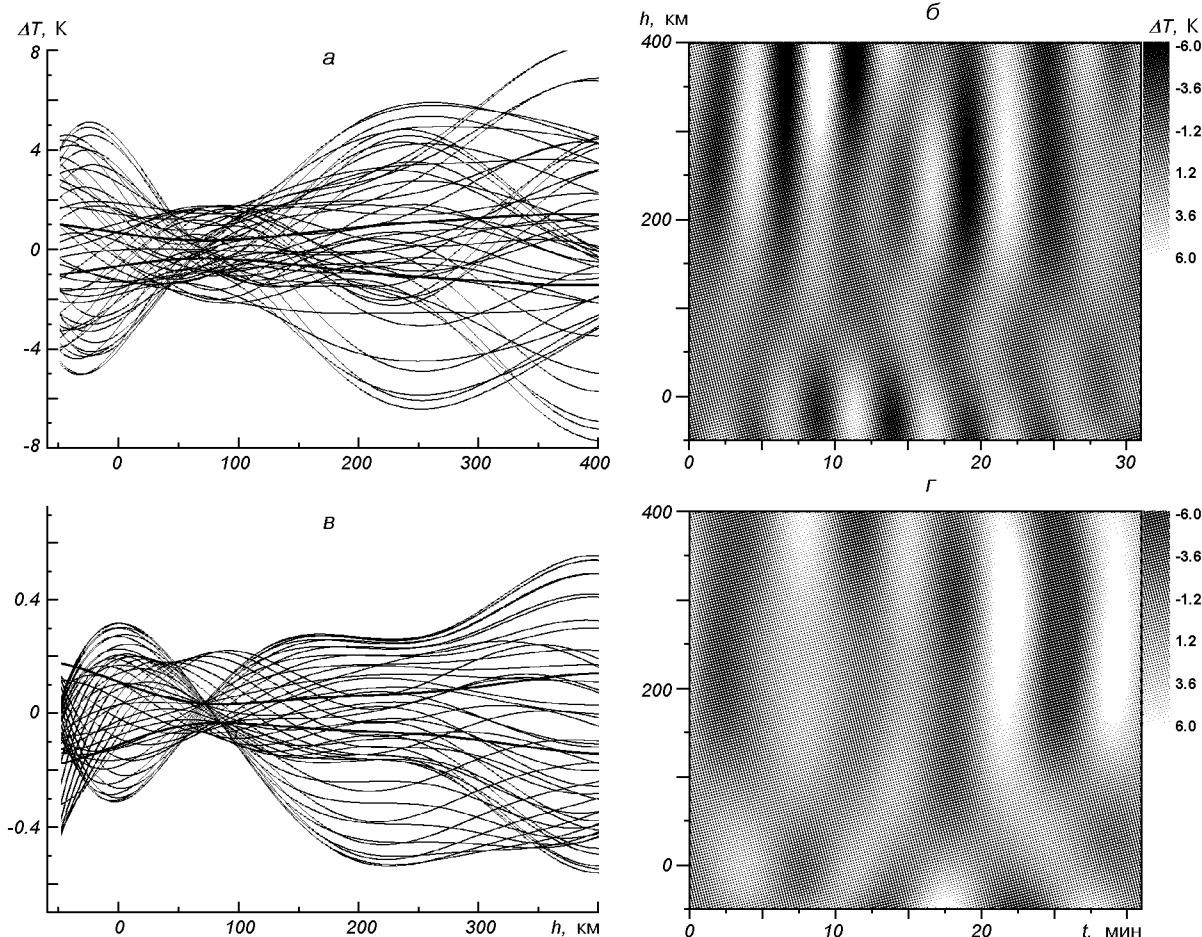


Рис. 7. Воспроизведенные по профилям с высоким пространственным разрешением глобальные акустические колебания температуры; 5-минутные: *а* — высотная стратификация, *б* — временная развертка; 10-минутные: *в* — высотная стратификация, *г* — временная развертка

Итак, наблюдения с высоким пространственным разрешением выявляют:

- наличие волновых цугов со временем жизни не менее 30 мин,
- отражение волновых цугов от верхних слоев атмосферы,
- конструктивную интерференцию цугов пятиминутных колебаний.

При исследовании волнового компонента в фотосфере проявляется синфазность временных вариаций экстремальных значений температуры вдоль рассматриваемой поверхности Солнца. Это — результат наложения глобальных колебаний низких порядков l на более мощные локальные колебания.

Пространственное усреднение воспроизведенной волновой составной $T(t, x, h)$ по поверхности дает оценку высотного распределения $\bar{T}(t, h)$ глобальных колебаний низких порядков l . В $k - \omega$ -представлении колебаний глобальным осцилляциям низких порядков l соответствует узкая область, которая примыкает к оси ω . Полученные таким образом псевдоглобальные колебания в атмосфере Солнца представлены на рис. 7 (пятиминутные и десятиминутные колебания).

На рис. 7, *a*, *b* показан результат наложения высотной стратификации глобальных колебаний низких порядков l ($T = 5$ и 10 мин) температуры (тонкие сплошные линии) в разные моменты времени. Две симметричные толстые линии показывают изменение с высотой среднего квадратического отклонения оценки амплитуды колебаний, полученной путем усреднения по пространственной координате X ; на всех исследуемых высотах выделенный сигнал глобальных колебаний превышает среднеквадратическое отклонение. Кроме того, псевдоглобальные возмущения температуры не менее чем на порядок меньше локальных и немного превышают возмущения, выделенные по VIRGO SPM и ДИФОС-Ф. Как и при воспроизведении колебаний по наблюдениям яркости, амплитуда колебаний увеличивается в верхних слоях; она увеличивается также в нижней фотосфере.

В слоях $-20 \text{ км} < h < 100 \text{ км}$ амплитуда колебаний уменьшена. В этой области вырисовываются узлы колебаний, которые соответствуют колебаниям разных l ; вырисовываются также пучности. Для десятиминутных колебаний ситу-

ация аналогична; правда, их амплитуда меньше.

На рис. 7, *б* и *г* представлена временная развертка полученных нами 5-мин и 10-мин глобальных колебаний. В нижних ($h < 25 \text{ км}$) и верхних слоях ($h > 100 \text{ км}$) возникают стоячие волны (фаза изменяется на 180°). На высотах от вершины конвективной зоны до области проникающей конвекции структура колебаний претерпевает наибольшие изменения: так, изменяется положение узлов, наклонные участки свидетельствуют о перемещении узлов вверх-вниз, в некоторые моменты времени стоячие волны отсутствуют. Такая сложная структура колебаний свидетельствует о том, что мы наблюдаем колебания, порожденные прохождением глобальных волн разных l (при увеличении наблюдаемой области с последующим усреднением колебания больших l слаживаются).

Поскольку количество точек наблюдения вдоль поверхности Солнца не достаточно большое (170 точек; ПЗС-матрица 512×512 , каждые три последовательные пикселя усредняли вдоль пространственной координаты, тогда $\Delta X = 378 \text{ км}$, что соответствует пространственному разрешению $0.5''$), то возникает вопрос о статистической устойчивости полученных средних. Мы провели аналогичные расчеты для вдвое меньшей выборки данных: результаты качественно совпадают, что подтверждает наличие глобального компонента.

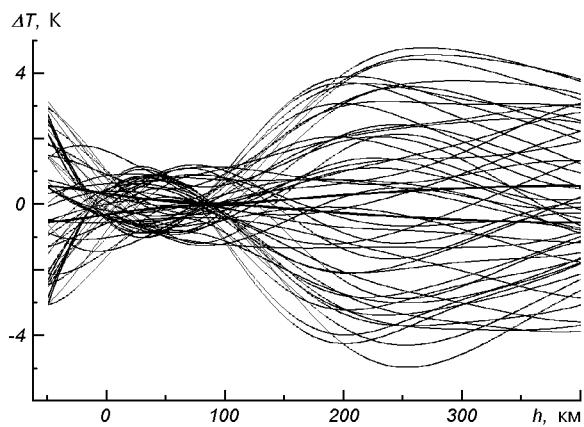


Рис. 8. Высотная стратификация воспроизведенных глобальных акустических колебаний после фильтрации пространственных частот

Конечно, увеличение размеров наблюдаемой области позволит более качественно выделить глобальные колебания. К сожалению, мы можем разве что промоделировать такой случай путем дополнительной фильтрации высоких и средних пространственных частот (устранялись колебания с $\lambda < 6$ Мм) с последующим пространственным усреднением. После такой обработки более отчетливо обрисовываются узлы стоячих волн при $h \approx -15$ км и $h \approx 80 \pm 90$ км (см. рис. 8).

Выделенные из пространственно-временных вариаций псевдоглобальные колебания несколько больше, но все-таки почти того же порядка, что и воспроизведенные по вариациям потока излучения. Кроме того, такая глобальная составляющая колебаний есть на всем рассматриваемом участке протяженностью 64 Мм вдоль поверхности Солнца.

Таким образом, рассеянные на фотосферных неоднородностях глобальные p -моды низких порядков l дают глобальную конструктивную интерференцию (наложение падающих и отраженных волн), что приводит к образованию в фотосферных слоях стоячих волн; последние вызывают модуляцию яркости Солнца.

Выясним вклад атмосферных гравитационных волн в колебания солнечного потока излучения. Гравитационные волны возникают в результате проникновения газовых потоков в конвективно устойчивые слои; они распространяются от источников в наклонном направлении и могут давать конструктивную или же деструктивную интерференцию. Гравитационные волны формируют структуру в верхней фотосфере и нижней хромосфере Солнца [32].

Гравитационные волны трудно выявить: они короткие, вследствие чего их тяжело отделить от грануляции; из-за наклонного распространения гравитационные волны вызывают незначительные доплеровские сдвиги. Наличие гравитационных волн в средней фотосфере подтверждено результатами наблюдений [36].

Гравитационные волны можно выделить с помощью преобразования Фурье: колебания, оставшиеся после устранения акустических колебаний и конвективных движений, мы рассматриваем как гравитационные волны. Для гравитационных волн должно также выполняться условие $\omega \leq N$, где N — частота Брента — Вайсаля.

Двухмерная температурная структура, обра-

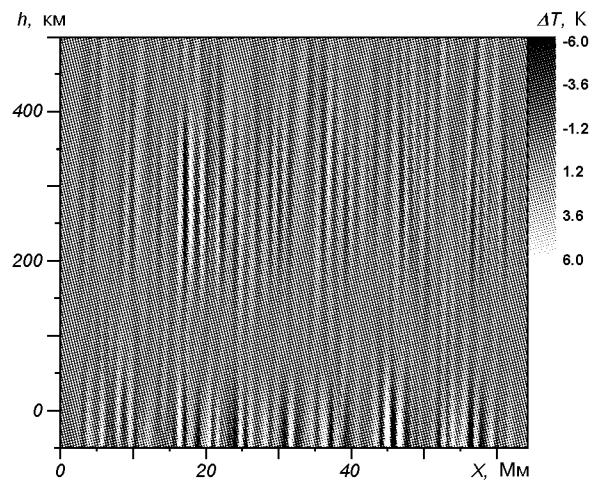


Рис. 9. Температурная структура воспроизведенных 5-минутных гравитационных колебаний по данным VTT

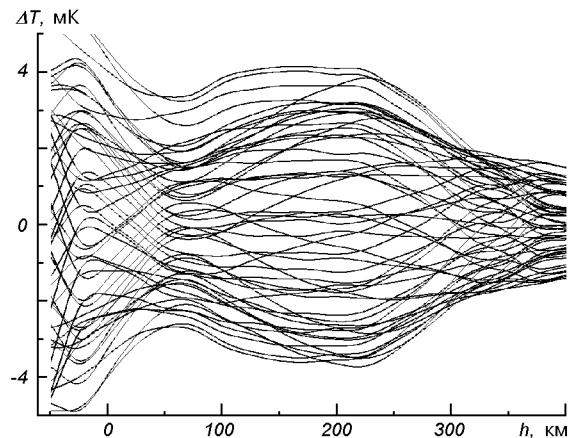


Рис. 10. Воспроизведенная по профилям высокого пространственного разрешения высотная стратификация псевдоглобальных 5-мин гравитационных колебаний

зованная гравитационными волнами в солнечной фотосфере, показана на рис. 9 (данные VTT). Пространственная структура гравитационных волн не похожа на структуру пятиминутных акустических колебаний (рис. 4) и тем более на структуру конвективных движений [6].

Скорость распространения гравитационных волн существенно меньше звуковой; поэтому пространственная структура пятиминутных волн напоминает структуру двух-трехминутных акустических осцилляций. Из-за малой длины волны g -моды более чувствительны к неоднородностям на грануляционных масштабах, особенно в пере-

ходном слое к проникающей конвекции, а также на высотах $h \geq 400$ км, где образуются интенсивные горизонтальные потоки. Именно на этих высотах наблюдается искривление фронтов гравитационных волн. В связи с этим возможен (хотя не обязательно) вклад g -мод в наблюдавшиеся колебания яркости Солнца.

Оказывается, что в области пятиминутных колебаний вклад в псевдоглобальные колебания гравитационных волн гораздо меньший, чем акустических. На рис. 10 представлены псевдоглобальные возмущения температуры, вызванные гравитационными колебаниями.

Амплитуды этих возмущений гораздо меньше среднего квадратического отклонения; они более чем на три порядка меньше локальных возмущений, что значительно меньше наблюдавшихся значений; кроме того, наблюдавшееся увеличение температурных возмущений с высотой не отмечается. Следовательно, атмосферные гравитационные волны могут давать разве что локальную интерференцию; их глобальная интерференция если и имеет место, то вклад ее в колебания яркости несущественный (в нашем исследовании не выявлен).

ВЫВОДЫ

В результате нашего исследования пятиминутных осцилляций яркости Солнца можно сделать следующие выводы.

- Впервые по наблюдаемым потокам непрерывного излучения и по профилям фраунгоферовых линий с высоким пространственным разрешением воспроизведена высотная стратификация глобальных вариаций температуры низких порядков l в фотосфере.
- Амплитуда таких глобальных колебаний увеличивается в сторону верхних слоев атмосферы: $100 < h < 180$ км и в нижней фотосфере ($h < 20$ км).
- Пятиминутные колебания яркости Солнца порождены глобальными стоячими волнами, один из узлов которых находится на начало переходной области к проникающей конвекции $h \approx 90\ldots 100$ км, а пучности при $h \approx 50$ и 180 км.
- На локальные акустические колебания фотосфера накладываются глобальные колеба-

ния, амплитуда которых не более чем на порядок ниже амплитуды локальных; выделенные из пространственно-временных вариаций псевдоглобальные колебания того же порядка величины, что и колебания, восстановленные по изменению потоков излучения в разных спектральных диапазонах.

- Атмосферные g -моды не дают заметного вклада в глобальные низких порядков l пятиминутные колебания температуры фотосфера.
- Пятиминутные осцилляции яркости Солнца возникают, скорее всего, в результате рассеяния p -мод низких порядков l на солнечной грануляции с последующей конструктивной интерференцией.

1. Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Гопасюк С. И. и др. Вариации глобальных характеристик Солнца / Под ред. Э. А. Гуртовенко. — Киев: Наук. думка, 1991.— 304 с.
2. Костик Р. І., Осіпов С. М., Лебедєв М. І. Перші результати експерименту ДИФОС-Ф // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С.10—12.
3. Костик Р. І., Щукина Н. Г. Пятиминутные колебания и тонкая структура фотосферы Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 1.—С. 25—37.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. — М.: Гос. изд-во технико-теор. лит-ры, 1953.—788 с.
5. Стоділка М. І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журн. фіз. досліджень.—2002.—6, № 4.—С.435—442.
6. Стоділка М. І. Температурна структура реальної сонячної грануляції // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 407—416.
7. Стоділка М. І. Застосування інверсних методів при дослідженні коливань яскравості Сонця // Журн. фіз. досліджень.—2004.—8, № 2.—С. 192—198.
8. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. — М.: Сов. радио, 1980.—223 с.
9. Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al. Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns // Astron. and Astrophys.—1996.—313, N 1.—P. 297—305.
10. Frohlich C., Bonnert R. M., Bruns A. V., et al. IPIHIR: The helioseismology experiment on the PHOBOS mission // Seismology of the Sun and Sun-like stars, ESA SP-286.—1988.—P. 359—362.
11. Georgobiani G., Kosovichev A. G., Nigam R., et al. Numerical simulations of oscillation modes of the solar convective zone // Astrophys. J.—2000.—530.—P. L139—L142.
12. Hasler K.-H., Zhugzhda Y. D., Lebedev N. L., et al. Observation of solar low- l p -modes by the CORONAS-DIFOS experiment // Astron. and Astrophys.—1997.—322, N 1.—P. L41—L44.

13. Hickey J. R., Stowe L. L., Jacobowitz H., et al. Initial solar irradiance determinations from NIMBUS-7 cavity radiometer measurements // *Science*.—1980.—**208**.—P. 281—297.
14. Hoekzema N. M., Brandt P. N., Rutten R. J. Small-scale topology of solar atmosphere dynamics. III. Granular persistence and photospheric wave amplitudes // *Astron. and Astrophys.*.—1998.—**333**, N 1.—P. 322—332.
15. Hoekzema N. M., Rutten R. J. Small scale topology of solar atmosphere dynamics. II. Granulation, K2v grains and waves // *Astron. and Astrophys.*.—1998.—**329**, N 2.—P. 725—734.
16. Hoekzema N. M., Rutten R. J., Brandt P. N., Shine R. A. Small-scale topology of solar atmosphere dynamics. I. Wave sources and wave diffraction // *Astron. and Astrophys.*.—1998.—**329**, N 1.—P. 276—290.
17. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*.—2001.—**369**, N 1.—P. 660—671.
18. Kiefer M., Stix M., Balthasar H. Wave modulation and wave sources in the solar convection zone // *Astron. and Astrophys.*.—2000.—**359**, N 2.—P. 1175—1184.
19. Komm R., Howe R., Hill F. Localizing width and energy of solar global *p*-modes // *Astrophys. J.*.—2002.—**572**, N 1.—P. 663—673.
20. Lebedev N. I., Oraevsky V. N., Zhugzhda Y. D., et al. First results of the CORONAS—DIFOS experiment. Space observations of solar irradiance oscillations // *Astron. and Astrophys.*.—1995.—**296**, N 1.—P. L25—L28.
21. Murawski K., Pelinovskii E. N. The effect of random flow on solar acoustic waves // *Astron. and Astrophys.*.—2000.—**359**, N 2.—P. 759—765.
22. Musman S., Rust D. M. Vertical velocities and horizontal wave propagation in the solar photosphere // *Solar Phys.*.—1970.—**13**, N 1.—P. 261—286.
23. Nordlund A., Stein R. F. Solar Oscillations and Convection. I. Formalism for Radial Oscillations // *Astrophys. J.*.—2001.—**546**, N 1.—P. 576—584.
24. Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. Numerical recipes. — Cambridge: Union. Press, 1992.—934 p.
25. Puschmann K., Vazquez M., Bonet J. A., et al. Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the sun. I. Analysis of global and spatial variations of line parameters // *Astron. and Astrophys.*.—2003.—**408**, N 1.—P. 363—378.
26. Restaino S. R., Stebbins R. T., Goode P. R. Observation of impulsive acoustic events and the excitation of solar oscillations // *Astrophys. J.*.—1993.—**408**, N 1.—P. L57—L60.
27. Rimmele T. R., Goode P. R., Harold E., Stebbins R. T. Dark lanes in granulation and the excitation of solar oscillations // *Astrophys. J.*.—1995.—**444**, N 2.—P. L119—L122.
28. Robinson F. J., Demarque P., Li L. H., et al. Three-dimensional convection simulations of the outer layers of the Sun using realistic physics // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*.—2003.—**340**, N 3.—P. 923—936.
29. Rodriguez Hidalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M. Lagrangian and Eulerian Stratifications of Acoustic Oscillations through the Solar Photosphere // *Astrophys. J.*.—2001.—547, N 1.—P. 491—502.
30. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*.—1992.—**398**, N 1.—P. 375—385.
31. Ruiz Cobo B., Rodriguez Hidalgo I., Collados M. Stratification with Optical Depth 5 Minute Oscillation through solar Photosphere // *Astrophys. J.*.—1997.—**488**, N 1.—P. 462—472.
32. Rutten R. J., de Wijn A.G, Sutterlin P. DOT tomography of the solar atmosphere. II. Reversed granulation in Ca II H // *Astron. and Astrophys.*.—2004.—**416**, N 1.—P. 333—340.
33. Rutten R. J., Krijger J. M. Dynamics of the solar chromosphere. IV. Evidence for atmospheric gravity waves from TRACE // *Astron. and Astrophys.*.—2003.—**407**, N 2.—P. 735—740.
34. Stein R. F., Nordlund A. Solar Oscillations and Convection. II. Excitation of Radial Oscillations // *Astrophys. J.*.—2001.—**546**, N 1.—P. 585—603.
35. Stix M. Modulation of Acoustic Waves by Solar Convection // *Solar Phys.*.—2000.—**196**, N 1.—P. 19—27.
36. Straus T., Bonacini D. Dynamics of the solar photosphere. I. Two-dimensional spectroscopy of mesoscale phenomena // *Astron. and Astrophys.*.—1997.—**324**, N 2.—P. 704—712.
37. Strous L. H., Goode P. R., Rimmele T. R. The Dynamics of the Excitation of Solar Oscillations // *Astrophys. J.*.—2000.—**535**, N 2.—P. 1000—1013.
38. Willson R. C. Measurements of solar total irradiance and its variability // *Space Sci. Rev.*.—1984.—**38**.—P. 203—242.
39. Woodard M., Hudson H. Solar oscillations observed in the total irradiance // *Solar Phys.*.—1983.—**82**, N 1.—P. 67—73.
40. Zhugzhda Y. D. Waves in a convective atmosphere: 1D periodical model // *Astron. and Astrophys.*.—1998.—**332**, N 1.—P. 314—324.
41. Zhugzhda Y. D. Waves and shear flows // *Astron. and Astrophys. Transactions*.—2003.—**22**, N 4-5.—P. 593—606.
42. Zhugzhda Y. D., Stix M. Acoustic waves in structured media and helioseismology // *Astron. and Astrophys.*.—1994.—**291**, N 1.—P. 310—319.

ON THE NATURE OF SOLAR IRRADIANCE FIVE-MINUTE OSCILLATIONS

M. I. Stodilka

We examined a possible nature and the origin of solar irradiance five-minute oscillations. Using solar radiation observations (DIFOS-F, VIRGO SPM, the line λ 532.418 nm Fe I of a high spatial resolution) we solved inverse radiative transfer problem and reproduced height stratification of the local and global temperature oscillations of low l in the solar photosphere. Pseudoglobal oscillations of temperature were extracted from photosphere oscillations, which enabled us to study the contribution of acoustic and internal gravity modes into the solar irradiance oscillations. It is shown that the latter ones originate probably from the scattering *p*-modes of low l on the solar granulation with the subsequent constructive interference.

НАШІ АВТОРИ

АВДЄЄВ Вольт Васильович — виконувач обов'язків професора Дніпропетровського національного університету, доктор технічних наук, доцент.

Напрям науки — динаміка, балістика та керування літальними апаратами.

БОГОМ'Я Володимир Іванович — провідний спеціаліст Київського оперативного центру Національного центру управління та випробувань космічних засобів, кандидат технічних наук.

Напрям науки — наземний автоматизований комплекс керування, системи керування та навігації космічних апаратів.

БОДНЯ Олексій Леонідович — старший науковий співробітник Наукового центра аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — сучасні інформаційні технології, обробка інформації.

ГОРНОСТАЄВ Геннадій Федорович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук. Нагороджений медаллю ім. Ю. В. Кондратюка.

Напрям науки — розробка волоконно-оптичних вимірювальних систем.

ДМИТРЕНКО В'ячеслав Якович — провідний інженер лабораторії Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля. Напрям науки — комп'ютерне моделювання.

ДОНЕЦЬ В. В. — Казенне підприємство Центральне конструкторське бюро «Арсенал».

ДОЦЕНКО Олег Владленович — начальник групи лабораторії Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — забезпечення стійкості супутників до впливу факторів космічного простору.

ЗАГОРУЛЬКО Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, заступник начальника центру керування польотами космічних апаратів Національного центру управління та випробувань космічних засобів.

Напрям науки — наземний автоматизований комплекс керування, радіотехнічний комплекс, системи керування космічних апаратів.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — астрофізика, фізика сонячно-земних зв'язків, навколоземний космічний простір.

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович — заступник директора, завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, заслужений діяч науки й техніки України. Керівник напряму «Новітні технології» Державної програми досліджень в Антарктиці. Член редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія» та «Українського антарктичного журналу». Нагороджений відзнакою Президента України — орденом «За заслуги» III ступеня.

Напрям науки — електромагнітні дослідження, космічне приладобудування.

КОЧУБЕЙ Галина Сергіївна — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.
Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

КОЧУБЕЙ Світлана Михайлівна — провідний науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, доктор біологічних наук, професор.
Напрям науки — фізіологія рослин.

ЛІЗУНОВ Георгій В'ячеславович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.
Напрям науки — фізика плазми, навколоzemний космічний простір.

МАРКОВ Сергій Юрійович — старший науковий співробітник Наукового центра аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.
Напрям науки — великі системи управління геопросторовими даними та обробка матеріалів дистанційного зондування в інтересах землекористування і кадастру.

МОРГУН Олександр Андрійович — радник Ради Національної безпеки та оборони, кандидат технічних наук.
Напрям науки — наземний радіотехнічний комплекс, системи керування та навігації космічних апаратів.

ПАСІЧНИЙ Владислав Васильович — завідувач відділу високотемпературних процесів та геліотехніки Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України. Брав участь у випробуванні матеріалів для програм «Венера», «Марс», «Енергія — Буран» та ін.
Напрям науки — космічне матеріалознавство, сонячна енергетика.

ПИСЬМЕННИЙ Микола Іванович — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.
Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора Наукового центра аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України з науковою роботою, доктор технічних наук, професор.
Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматичне інтерпретування даних дистанційного зондування.

ПОТАПОВИЧ Лариса Петрівна — начальник групи Державного конструкторського бюро «Південне».
Напрям науки — технологія виробництва літальних апаратів.

ПРИЙМАК Анатолій Іванович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.
Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

СЕМЕНІВ О. В. — співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України.
Напрям науки — системний аналіз.

СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — провідний науковий співробітник Наукового центра аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.
Напрям науки — оцінка інформативності іконічних оптико-електронних систем, цифрова обробка та інтерпретація матеріалів дистанційного зондування.

СТОДІЛКА Мирослав Іванович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — нерівноважне перенесення випромінювання, діагностика атмосфери Сонця інверсними методами.

ТАРАСОВ Володимир Борисович — начальник лабораторії Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — забезпечення стійкості супутників до впливу факторів космічного простору.

ТИХИЙ Віктор Григорович — начальник відділу Державного конструкторського бюро «Південне», кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічне матеріалознавство.

ТКАЧЕНКО Галина Василівна — молодший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрям науки — матеріалознавство.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — начальник управління космічних програм наукових досліджень Національного космічного агентства України, завідувач лабораторії Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — матеріалознавство, космічні дослідження.

ХАНДРИГА П. А. — Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

ШОВКОПЛЯС Юрій Анатолійович — заступник головного конструктора КБ космічних апаратів та систем Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — проектування космічних апаратів.

ШУВАЛОВ Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, лауреат премії Національної академії наук України ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — плазмоелектродинаміка космічних апаратів, фізика плазми.

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Мусійович — завідувач відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України. Співкерівник Державної Програми досліджень в Антарктиді за напрямом «Фізика верхньої атмосфери та близького космосу», керівник декількох міжнародних проектів у галузі космічної радіофізики, член ряду національних та міжнародних наукових проблемних рад.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери та близького космосу, космічна радіофізика.

ЯЦЕНКО Віталій Олексійович — провідний науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, член Вченої Ради наукового фонду вчених та спеціалістів з молекулярної кібернетики та інформатики та член Вченої Ради з присудження наукових ступенів, доктор технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, космічна сенсорика.