

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 18
3 + 2012

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

ЗМІСТ

Макаров А. Л., Хорошилов С. В. Управление ориентацией солнечной батареи и передающей антенны электростанции космического базирования

Шувалов В. А., Токмак Н. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С. Синергетический эффект воздействия потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета на полиимидные пленки космических аппаратов

Донец В. В., Муравский Л. И. Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах

Ковбасюк С. В., Каневський Л. Б. Метод обработки траекторных данных для космических объектов у багатопозиційному оптичному комплексі

Сумарук Т. П., Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Геомагнітна активність та енергетика магнітосфери у 19—24-му циклах сонячної активності

Криштал А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д. К вопросу о возможности появления предвспышечных токовых слоев в хромосфере активной области Солнца

Смелая Т. Г. Оценка потоков техногенных частиц на поверхность космического аппарата «Січ-2»

CONTENTS

3 *Makarov A. L., Khoroshilov S. V.* Attitude control of solar battery and transmitting antenna for space solar power satellite

10 *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Pismenny N. I., Kochubey G. S.* Synergetic effect of atomic oxygen flow and vacuum ultraviolet flux on spacecraft polyimide films

20 *Donets V. V., Muravskiy L. I.* Some features of the use of emission detectors in on-board hyperspectrometers

38 *Kovbasiuk S. V., Kanevskiy L. B.* A method of trajectory processing for spacecrafts in multipositional optical complex

46 *Sumaruk T. P., Sumaruk P. V., Sumaruk Y. P.* Geomagnetic activity and energetics of the magnetosphere during the 19—24th solar activity cycles

52 *Kryshtal A. N., Gerasimenko S. V., Voitsekhovska A. D.* To the problem of possibility of appearance of preflare current sheets in the chromosphere of active region

61 *Smelaya T. G.* Estimation of anthropogenic particles flux on space vehicle «Sich-2» surface

Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Пошук радіантів метеорних потоків за результатами базисних телевізійних спостережень 2001 та 2003 років

Березовський В. Я., Літовка І. Г., Весельський С. П., Заморська Т. М., Янко Р. В. Вплив екзогенного мелатоніну на ліпідний та амінокислотний склад органічного матриксу кісткової тканини

НАУКОВІ УСТАНОВИ АЕРОКОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ

Лялько В. І., Попов М. О., Федоровський О. Д., Левчик О. І. Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» (до 20-річчя заснування)

НАШІ АВТОРИ

67 Kozak P. M., Rozhilo O. O., Taranukha Yu. G., Kruchynenko V. G. A search for meteor shower radiants from results of double-station TV observations in 2001 and 2003

78 Berezovskii V. A., Litovka I. G., Veselskii S. P., Zamorska T. M., Yanko R. V. Exogenous melatonin influence on lipid and amino acid composition of bone's organic matrix

RESEARCH ORGANIZATIONS OF THE AEROSPACE FIELD

83 Lyalko V. I., Popov M. O., Fedorovskyi O. D., Levchik O. I. The State Organization «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine» (To the 20th anniversary of the foundation)

89 OUR AUTHORS

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

Підписано до друку 21.05.12. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 9,45. Обл.-вид. арк. 9,92. Тираж 100 прим. Зам. № 3288.

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

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

УДК 629.7

А. Л. Макаров¹, С. В. Хорошилов²

¹Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

²Інститут технічної механіки Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ И ПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Розглянуто задачу керування орієнтацією сонячної батареї та передавальної антени сонячної електростанції космічного базирования з урахуванням великої невизначеності масово-інерційних характеристик об'єкту керування і взаємовпливу каналів регулювання. Для розв'язування цієї задачі запропоновано регулятор, у складі якого використано внутрішній контур оцінки неточностей математичної моделі станції як об'єкту керування.

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченные запасы топлива, используемого в традиционной энергетике, а также усиливающиеся экологические проблемы заставляют человечество искать новые средства и методы получения энергии для удовлетворения своих потребностей. Одной из альтернатив традиционной электроэнергетике могут служить солнечные электростанции космического базирования (СЭКБ) [2]. Предполагается, что такие электростанции будут располагаться на орбите, где плотность солнечного излучения значительно выше, чем на поверхности Земли. Солнечная электростанция космического базирования должна выполнять сбор и преобразование энергии солнечного излучения, а также передачу этой энергии потребителям. Идея СЭКБ не нова [5], однако высокая себестоимость электроэнергии и технологические проблемы сдерживают процесс их разработки и внедрения. Тем не менее, быстрое развитие новых технологий и значительные успехи в области солнечных батарей, электроники, композитных материалов усилили интерес к СЭКБ. Так, на последнем Международном астронавтическом конгрессе в секции косми-

ческая энергетика участниками из США, стран Евросоюза, Японии, Китая и других государств были представлены десятки докладов, посвященных этой тематике [7].

Конструкция СЭКБ среди прочих возможных элементов, как правило, включает панели солнечной батареи (СБ) и передающую антенну (ПА). При этом панели СБ ориентируются на Солнце, а ПА — на приемную ректенну на Земле. Выполнение этих задач возлагается на систему управления ориентацией СЭКБ. Здесь следует отметить, что несмотря на достаточно большое количество публикаций, посвященных СЭКБ, вопросы управления ориентацией таких электростанций и ее элементов слабо освещены в печати. Среди немногочисленных публикаций следует отметить работу [6], в которой представлены результаты предварительной проработки системы управления СЭКБ «Abacus». Также представляет интерес работа [1], где рассматривается задача оптимального управления ориентацией СЭКБ на геостационарной орбите; при этом СБ и ПА станции активно стабилизируются по двум различным направлениям.

Сложность проведения полномасштабных экспериментов в случае СЭКБ приводит к значительной неопределенности значений массово-инерционных и других характеристик объекта

управления. Учитывая эту особенность, применение результатов работы [1] на практике представляется затруднительным.

В работе [3] с учетом особенностей СЭКБ как объекта управления предложен регулятор системы ориентации, использующий контур оценки значений различных возмущений для их последующей компенсации. Показаны преимущества такого регулятора при управлении СЭКБ по сравнению с традиционными подходами. Однако рассматривалась лишь задача ориентации панели СБ на Солнце. При этом движения панели СБ и ПА могут быть взаимосвязаны. В связи с этим в нашей работе будет рассматриваться ориентация СБ и ПА при наличии взаимовлияния между этими каналами управления.

Целью настоящей работы является синтез и анализ регуляторов систем управления ориентацией СБ и ПА солнечной электростанции космического базирования с учетом значительной неопределенности значений массово-инерционных характеристик объекта управления и взаимовлияния в каналах регулирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать СЭКБ, расположенную на околоземной орбите. Солнечная электростанция космического базирования представляет собой двухсоставной искусственный спутник, состоящий из панели СБ, преобразующей лучистую энергию Солнца в электроэнергию, и антенны, передающей эту энергию на приемную станцию в виде СВЧ-излучения. Необходимо обеспечить постоянную ориентацию панелей СБ на Солнце и стабилизировать положение ПА относительно направления на приемную станцию при наличии возмущений и низких частот собственных колебаний элементов конструкции. Предполагается, что плоскость орбиты совпадает с плоскостью эклиптики. В таком случае процесс наведение СБ и ПА может быть представлен в виде их угловых перемещений в плоскости и из плоскости эклиптики. В целях краткости будем рассматривать лишь ориентацию элементов станции в плоскости эклиптики. Управляющие воздействия осуществляются при помощи гипотетических исполнительных органов, созда-

ющих необходимые управляющие моменты. Предполагается, что проблема взаимовлияния углового движения станции и ее упругих деформаций решается путем выбора соответствующей полосы пропускания регулятора.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для синтеза законов управления используем предложенную в работе [1] модель СЭКБ, описывающую движение СБ и ПА в плоскости эклиптики.

Модель СЭКБ состоит из двух твердых абсолютно жестких штанг, соединенных шарниром (рис. 1). На одной штанге закреплена плоская СБ, а на другой — антенна. Штанги перпендикулярны к плоскостям СБ и антенны соответственно. На противоположных концах штанги закреплены противовесы m_c , m_a . В дальнейшем для краткости СБ называется подсистема, состоящая из штанги с солнечной батареей и противовеса, а антенной — остальные части модели СЭКБ. Считается, что точка соединения штанг O является центром масс каждой из двух подсистем СЭКБ. Предполагается, что станция движется равномерно по орбите, плоскость которой совпадает с плоскостью эклиптики, штанги батареи и антенны находятся в этой плоскости.

Для описания движения СЭКБ использованы следующие системы координат: oxy — инерциальная система координат, плоскость которой совпадает с плоскостью эклиптики, $Ox_s y_s$ — солнечная система координат, ось Ox_s направлена на Солнце, а ось Oy_s — по вектору орбитальной скорости Земли, $Ox_o y_o$ — орбитальная система координат, ось Ox_o направлена по радиусу-вектору, соединяющему центр масс Земли и СЭКБ, а ось Oy_o лежит в плоскости орбиты, $Ox_c y_c$ — связанная с панелью СБ система координат, оси Ox_c и Oy_c направлены по главным центральным осям инерции СБ, $Ox_a y_a$ — связанная с передающей антенной система координат, оси Ox_a и Oy_a направлены по главным центральным осям инерции антенны.

Ориентация панели солнечной батареи СЭКБ и ее передающей антенны задается следующими углами: φ_c — отклонение оси панели СБ от на-

правления на Солнце, φ_a — отклонение оси антенны от направления на приемную антенну.

Долгота Земли, отсчитываемая от точки весны, определяется из выражения

$$\alpha_0 = \alpha_0^0 + \omega_0 t,$$

где α_0^0 — начальное значение долготы Земли, ω_0 — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси, t — время.

Долгота Солнца от точки весны задается так:

$$\alpha_s = \alpha_s^0 + \omega_s t,$$

где α_s^0 — начальное значение долготы Солнца, ω_s — угловая скорость вращения Земли вокруг Солнца.

Уравнения движения относительно центра масс СБ и антенны получены с использованием закона изменения кинетического момента в следующем виде:

$$\begin{aligned} j_c^z \ddot{\varphi}_c = & 3\omega_0^2 (j_c^y - j_c^x) \cos(\alpha_0 + \alpha_s - \varphi_c) - \\ & -(1 - \varepsilon_c) p S_c l_c |\cos(\varphi_c)| \sin(\varphi_c) + \\ & + K(\dot{\varphi}_c + \omega_s - \dot{\varphi}_a - \omega_0) + M_c^u, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} j_a^z \ddot{\varphi}_a = & -3\omega_0^2 (j_a^y - j_a^x) \cos(\varphi_a) \sin(\varphi_a) - \\ & -(1 - \varepsilon_a) p S_a l_a |\cos(\varphi_a + \alpha_0 - \alpha_s)| \times \\ & \times \sin(\varphi_a + \alpha_0 - \alpha_s) + K(\dot{\varphi}_a + \omega_0 - \dot{\varphi}_c - \omega_s) + M_a^u, \end{aligned} \quad (2)$$

где j_c^z , j_c^x , j_c^y — диагональные элементы тензора инерции СБ, ε_c — коэффициент отражения лучей от поверхности СЭКБ, p — величина светового давления на орбите Земли, S_c — площадь поверхности СБ, K — коэффициент трения в шарнире, M_c^u — управляющий момент, действующий на СБ; j_a^x , j_a^y , j_a^z — диагональные элементы тензора инерции антенны, ε_a — коэффициент отражения лучей от поверхности антенны, S_a — площадь поверхности антенны, M_a^u — управляющий момент, действующий на антенну СЭКБ.

СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Математическая модель объекта управления описывается уравнениями (1), (2). Это связанная система нелинейных уравнений. В связи с этим, а также учитывая значительные возможные от-

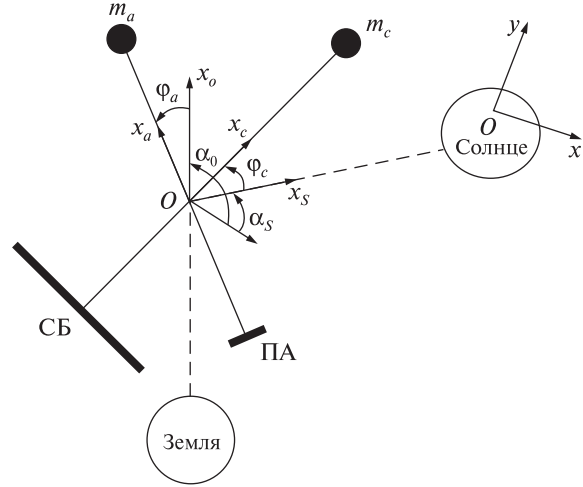


Рис. 1. Схема солнечной электростанции космического базирования

клонения расчетных параметров от их реальных значений, для синтеза законов управления преобразуем систему уравнений (1) — (2), используя следующие обозначения:

$$\begin{aligned} M_c^v = & 3\omega_0^2 (j_c^y + \Delta j_c^y - j_c^x - \Delta j_c^x) \cos(\alpha_0 + \alpha_s - \varphi_c) - \\ & - p(1 - \varepsilon_c)(S_c + \Delta S_c)(l_c + \Delta l_c) \times \\ & \times |\cos(\varphi_c)| \sin(\varphi_c) + (K + \Delta K)(\dot{\varphi}_c + \omega_s - \dot{\varphi}_a - \omega_0), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_a^v = & -3\omega_0^2 (j_a^y + \Delta j_a^y - j_a^x - \Delta j_a^x) \cos(\varphi_a) \sin(\varphi_a) - \\ & - p(1 - \varepsilon_a)(S_a + \Delta S_a)(l_a + \Delta l_a) \times \\ & \times |\cos(\varphi_a + \alpha_0 - \alpha_s)| \sin(\varphi_a + \alpha_0 - \alpha_s) + \\ & + (K + \Delta K)(\dot{\varphi}_a + \omega_0 - \dot{\varphi}_c - \omega_s). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь и далее символ Δ обозначает разницу между расчетным и фактическим значением соответствующей величины.

С учетом (3), (4) система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_c = & \frac{M_c^v + M_c^u}{j_c^z + \Delta j_c^z}, \\ \ddot{\varphi}_a = & \frac{M_a^v + M_a^u}{j_a^z + \Delta j_a^z}. \end{aligned}$$

Представим эти уравнения таким образом:

$$\ddot{\varphi}_c = \frac{M_c^u}{j_c^z} + w_c, \quad (5)$$

$$\ddot{\varphi}_a = \frac{M_a^u}{j_a^z} + w_a, \quad (6)$$

где w_c — возмущение, вызванное моментом M_c^v и отличием фактического значения j_c^z от расчетного, w_a — возмущение, обусловленное моментом M_a^v и отличием фактического значения j_a^z от расчетного.

Вводя новые переменные

$$\psi_{1c} = \varphi_c, \quad \psi_{3c} = w_c,$$

$$\psi_{1a} = \varphi_a, \quad \psi_{3a} = w_a,$$

представим уравнение (5) в форме метода пространства состояния:

$$\dot{\psi}_{1c} = \psi_{2c}, \quad \dot{\psi}_{2c} = \psi_{3c} + M_c^u / j_c^z,$$

$$\dot{\psi}_{3c} = \dot{w}_c = h_c, \quad y_c = \psi_{1c}.$$

Аналогичным образом уравнение (6) можно записать в виде

$$\dot{\psi}_{1a} = \psi_{2a}, \quad \dot{\psi}_{2a} = \psi_{3a} + M_a^u / j_a^z,$$

$$\dot{\psi}_{3a} = \dot{w}_a = h_a, \quad y_a = \psi_{1a}.$$

Следуя результатам работы [4], наблюдатель для расширенного вектора состояния канала управления СБ может быть синтезирован в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_{1c} &= \eta_{2c} - l_{1c} (\eta_{1c} - \psi_{1c}), \\ \dot{\eta}_{2c} &= \eta_{3c} - l_{2c} (\eta_{1c} - \psi_{1c}) + u_c / j_c^z, \\ \dot{\eta}_{3c} &= -l_{3c} (\eta_{1c} - \psi_{1c}), \end{aligned} \quad (7)$$

где η_{1c} , η_{2c} , η_{3c} — оценки величин ψ_{1c} , ψ_{2c} , ψ_{3c} ; величины l_{1c} , l_{2c} , l_{3c} — коэффициенты усиления наблюдателя в канале СБ.

Аналогично наблюдатель для расширенного вектора состояния канала управления ПА имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_{1a} &= \eta_{2a} - l_{1a} (\eta_{1a} - \psi_{1a}), \\ \dot{\eta}_{2a} &= \eta_{3a} - l_{2a} (\eta_{1a} - \psi_{1a}) + u_a / j_a^z, \\ \dot{\eta}_{3a} &= -l_{3a} (\eta_{1a} - \psi_{1a}), \end{aligned} \quad (8)$$

где η_{1a} , η_{2a} , η_{3a} — оценки величин ψ_{1a} , ψ_{2a} , ψ_{3a} ; l_{1a} , l_{2a} , l_{3a} — коэффициенты усиления наблюдателя в канале ПА.

Коэффициенты наблюдателя могут быть выбраны следующим образом [5]:

$$l_{1c} = 3\Omega_c, \quad l_{2c} = 3\Omega_c^2, \quad l_{3c} = \Omega_c^3,$$

$$l_{1a} = 3\Omega_a, \quad l_{2a} = 3\Omega_a^2, \quad l_{3a} = \Omega_a^3,$$

где Ω_c , Ω_a — верхние границы полосы пропускания наблюдателя в канале СБ и антенны соответственно.

Используя полученную с помощью наблюдателя (7) оценку $w_c \approx \eta_{3c}$, представим закон управления для канала ориентации СЭКБ в виде

$$M_c^u = j_c^z (M_c^{u0} - \eta_{3c}). \quad (9)$$

Аналогично для канала антенны с учетом $w_a \approx \eta_{3a}$ получим

$$M_a^u = j_a^z (M_a^{u0} - \eta_{3a}). \quad (10)$$

Использование таких законов управления позволяет преобразовать систему уравнений (5), (6) к виду

$$\ddot{\varphi}_c = M_c^{u0}, \quad (11)$$

$$\ddot{\varphi}_a = M_a^{u0}. \quad (12)$$

Для управления объектом, описываемым системой уравнений (11), (12), можно использовать пропорционально-дифференциальный регулятор, для которого закон управления имеет вид

$$M_c^{u0} = -k_{pc} \varphi_c - k_{dc} \eta_{2c}, \quad (13)$$

$$M_a^{u0} = -k_{pa} \varphi_a - k_{da} \eta_{2a}, \quad (14)$$

где k_{pc} , k_{dc} , k_{pa} , k_{da} — коэффициенты закона управления.

Коэффициенты k_{pc} , k_{dc} , k_{pa} , k_{da} могут быть выбраны, например, путем решения задачи модального управления. Для биномиального расщепления корней характеристического уравнения эти коэффициенты имеют следующие значения:

$$k_{pc} = \Omega_{rc}^2, \quad k_{di} = 2\Omega_{rc},$$

$$k_{pa} = \Omega_{ra}^2, \quad k_{da} = 2\Omega_{ra},$$

где Ω_{rc} , Ω_{ra} — верхняя граница полосы пропускания регулятора в канале СБ и антенны соответственно.

Подставив выражение (13) в (9) и (14) в (10), получим законы управления СЭКБ в следующем виде:

$$M_c^u = j_c^z (-k_{pc} \varphi_c - k_{dc} \eta_{2c} - \eta_{3c}),$$

$$M_a^u = j_a^z (-k_{pa} \varphi_a - k_{da} \eta_{2a} - \eta_{3a}).$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОРИЕНТАЦИИ ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ И ПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННЫ

Для иллюстрации эффективности предложенных алгоритмов управления проведены расчеты с использованием следующих исходных данных:

$$S_c = 1.9 \cdot 10^7 \text{ м}^2, S_a = 5.54 \cdot 10^5 \text{ м}^2, l_c = 5.675 \cdot 10^3 \text{ м},$$

$$l_a = 800 \text{ м}, \varepsilon_c = 0.01, \varepsilon_a = 0.85 \dots 1,$$

$$K = 8 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}, j_c^x = 4.432 \cdot 10^{13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$j_c^y = 6.648 \cdot 10^{13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2, j_c^z = 4.432 \cdot 10^{13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$j_a^x = 9.844 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2, j_a^y = 9.844 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$j_a^z = 5.045 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2, p = 4.62 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2.$$

При расчетах рассматривалась возможность отклонения конструктивных параметров СЭКБ

на величину, не превышающую 50 % от номинального значения.

На рис. 2—4 представлены результаты расчетов, полученные при следующих параметрах закона управления: $\Omega_{rc} = 0.2$ рад/с, $\Omega_{ra} = 0.2$ рад/с, $\Omega_c = 0.5$ рад/с, $\Omega_a = 0.5$ рад/с.

На рис. 2 показаны зависимости от времени возмущений w_c , w_a и их оценок η_{3c} , η_{3a} . Графики изменения управляющих моментов в каналах СБ и антенны показаны на рис. 3, а, б соответственно. Зависимости от времени углов ориентации СБ и антенны показаны на рис. 4.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчетов, полученные при следующих параметрах закона управления: $\Omega_{rc} = 0.2$ рад/с, $\Omega_{ra} = 0.2$ рад/с, $\Omega_c = 5$ рад/с, $\Omega_a = 5$ рад/с. Использование более широкой полосы пропускания наблюдате-

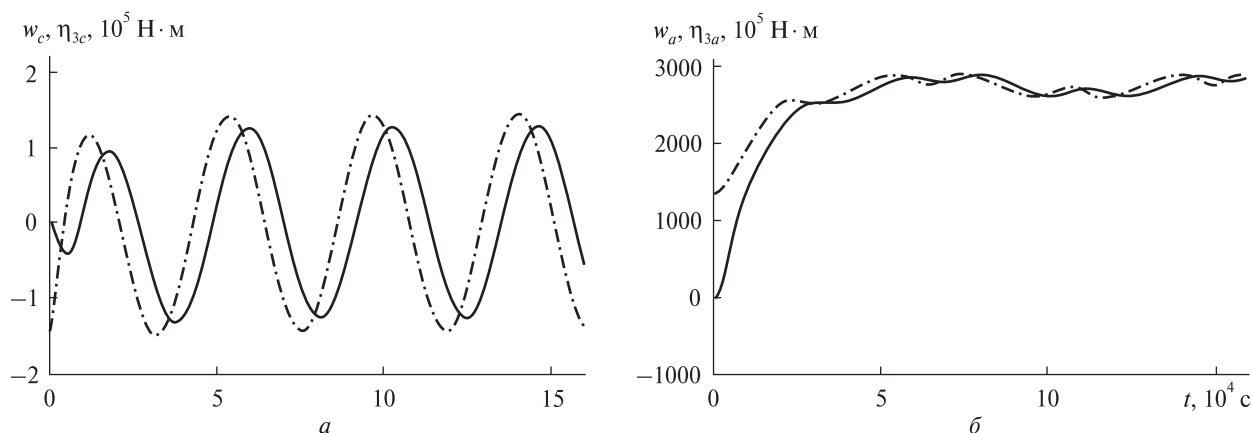


Рис. 2. Зависимость возмущений w_c , w_a (штрих-пунктир) и их оценок η_{3c} , η_{3a} (сплошная линия) от времени

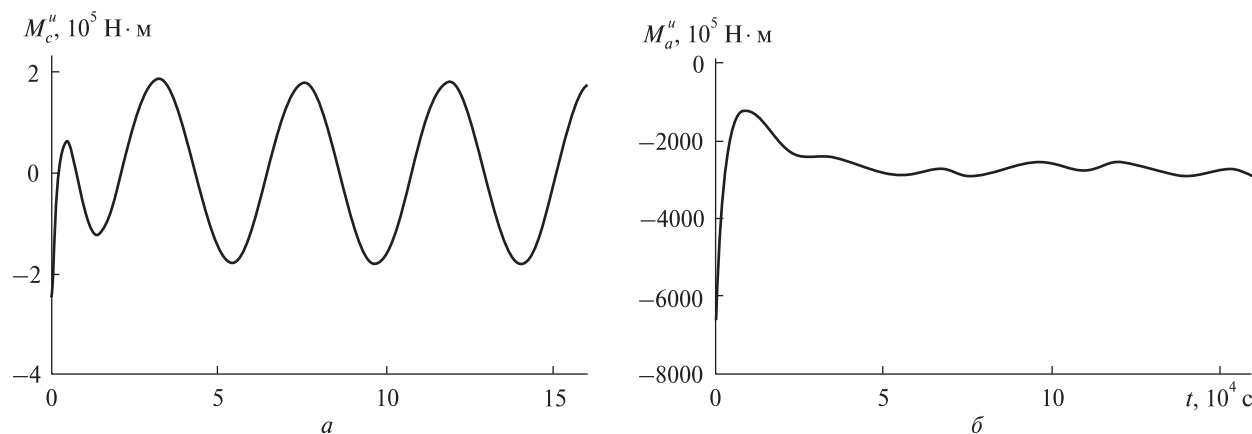


Рис. 3. Изменение управляющего момента солнечной батареи (а) и антенны (б) от времени

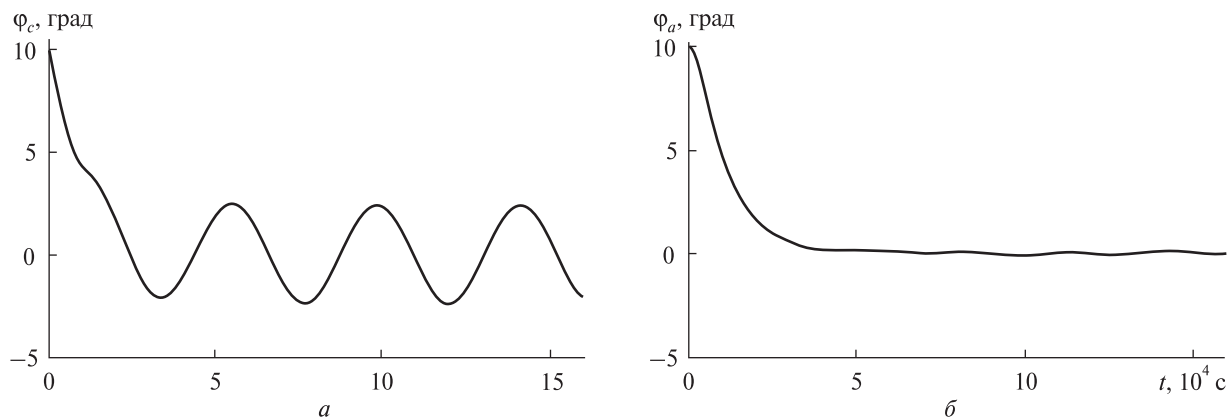


Рис. 4. Изменение угла ориентации солнечной батареи (а) и антенны (б) от времени

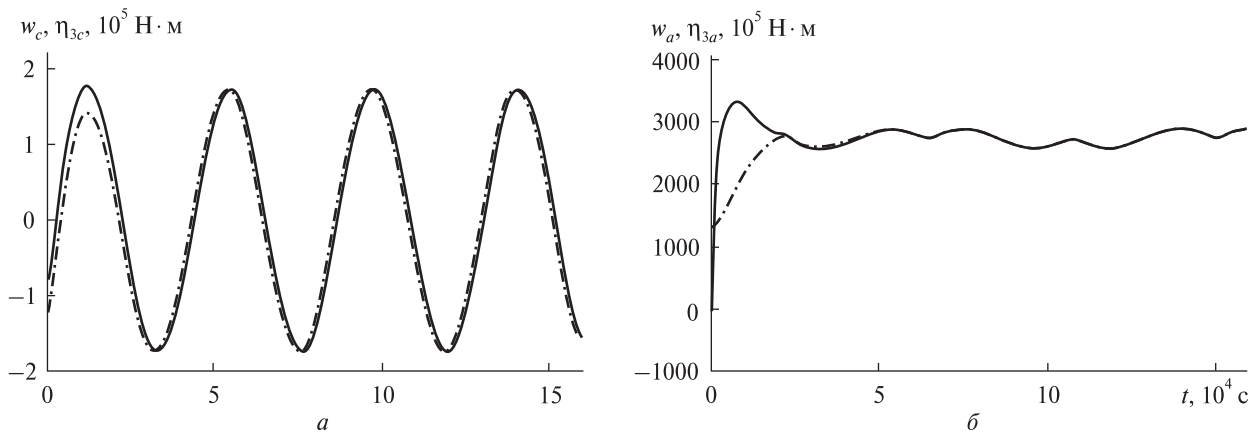


Рис. 5. Зависимость возмущения w_c, w_a (штрих-пунктир) и его оценки η_{3c}, η_{3a} (сплошная линия) от времени

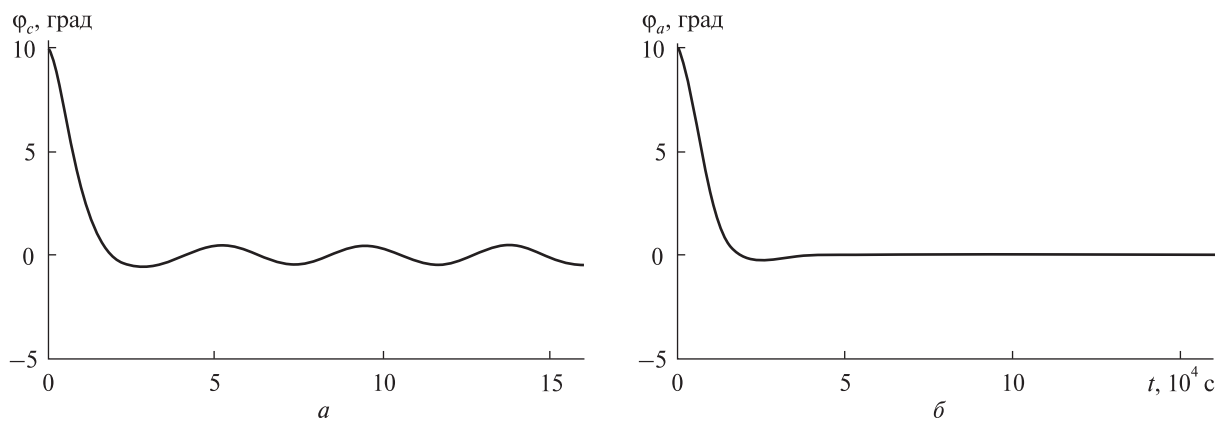


Рис. 6. Изменение угла ориентации солнечной электростанции космического базирования (а) и антенны (б) от времени

ля позволяет получить лучшую оценку величин возмущений (рис. 5). Более точные оценки величин возмущений позволяют обеспечить меньшую погрешность ориентации (рис. 6) в сравнении с предыдущим расчетным случаем (рис. 4) при выбранной полосе пропускания регулятора.

Как показали результаты расчетов, применение предложенного регулятора, включающего наблюдатель для расширенного вектора состояния, позволяет обеспечить необходимую точность управления СБ и антенной при значительных отклонениях между реальными и расчетными значениями конструктивных параметров.

ВЫВОДЫ

Мы получили алгоритмы управления наведением панели солнечной батареи и передающей антенны электростанции космического базирования. Использование в составе регулятора наблюдателя для расширенного вектора состояния позволило разбить математическую модель процесса наведения солнечной батареи и антенны, представляющую собой связанную нелинейную систему уравнений, на две независимые подсистемы. Такой подход дает возможность значительно упростить синтез законов управления при обеспечении необходимых точностных характеристик. При этом полученные алгоритмы управления обеспечивают необходимую точность наведения панели солнечной батареи и антенны при значительных отклонениях их реальных конструктивных параметров от расчетных. Исследования целесообразно продолжить с учетом пространственной математической модели динамики электростанции.

1. Белецкий В. В., Ковалева Е. Д. Оптимизация управления ориентацией солнечной космической электростанции. — М, 1987. — 21 с. — (Препринт / АН СССР. Ин-т прикладной математики).
2. Сысоев В. К., Пичхадзе К. М., Фельдман Л. И., Арапов Е. А. Концепция разработки космической солнечной электростанции // Вестник ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина». — 2011. — № 2. — С. 12—19.
3. Хорошилов С. В. Управление ориентацией солнечной электростанции космического базирования с использованием наблюдателя для расширенного вектора состояния // Техническая механика. — 2011. — Вып. 3. — С. 117—125.
4. Gao Z. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design // Proceeding of the American Control Conference. — 2006. — P. 2399—2405.
5. Glaser P. E. Power from the Sun: Its Future // Science. — 1968. — N 22 (162). — P. 857—861.
6. Wie B., Roithmayr C. Attitude and Orbit Control of a Very Large Geostationary Solar Power Satellite // J. Guidance, Control, and Dynamics. — 2005. — 28, N 3. — P. 439—451.
7. 62nd International Astronautical Congress. Final Program. — Cape Town: African astroissance, 2011. — 182 p.

Надійшла до редакції 02.04.12

A. L. Makarov, S. V. Khoroshilov

ATTITUDE CONTROL OF SOLAR BATTERY AND TRANSMITTING ANTENNA FOR SPACE SOLAR POWER SATELLITE

We consider the problem of attitude control of a solar battery and transmitting antenna for a space solar power satellite with taking into account substantial value uncertainty of mass-inertial characteristics of the control object and controller channel interference. A controller with the inner loop for the estimation of station mathematical model inaccuracy is proposed.

УДК 533.27:533.2

В. А. Шувалов, Н. А. Токмак, Н. И. Письменный, Г. С. Кочубей

Институт технической механики Национальной академии наук Украины
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА НА ПОЛИИМИДНЫЕ ПЛЕНКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Визначено порогові значення річного флюенсу атомарного кисню, а також відношення густини потоку вакуумного ультрафіолетового випромінювання сонячного спектру до густини надзвукового потоку атомарного кисню, які характеризують наявність синергетичного ефекту на втрату маси поліімідними плівками — конструкційними матеріалами КА.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные пленки, в частности полиимиды kapton-H, ПМ-А, ПМ-1Э, благодаря хорошим механическим, термооптическим, электрофизическим свойствам и химической стойкости широко используются в космической технике в качестве конструкционных материалов для покрытия наружных поверхностей космических аппаратов (КА), обшивки солнечных батарей, экранно-вакуумной теплоизоляции и т. д.

Околоспутниковая среда на высотах 200—800 км агрессивна по отношению к материалам наружных поверхностей КА, особенно полимерам. На околоземных орбитах (200—800 км) факторами, определяющими деградацию химических, термооптических и механических свойств полимеров, являются высокоскоростные потоки атомарного кислорода (ионы и нейтралы с энергией около 5 эВ), термоциклирование в вакууме и электромагнитное излучение Солнца, в частности вакуумный ультрафиолет (ВУФ) в диапазоне длин волн $\lambda_v \approx 10 \dots 200$ нм.

Воздействие высокоскоростных потоков атомарного кислорода (АК) приводит к эффективной окислительной деструкции полимерных

материалов с образованием летучих оксидов CO , CO_2 и H_2O , что и обуславливает унос массы материалов. Атомарный кислород инициирует поверхностные реакции, при этом модифицируется первый атомный слой (около 1 нм). Вакуумный ультрафиолет вызывает деструкцию ароматических групп ниже слоя поверхности, эродировавшего при бомбардировке АК. Нелетучие оксиды (Ag_2O , SiO_2 и др.) образуют оксидные покрытия (слои, пленки), которые существенно изменяют термооптические свойства материалов и, как следствие, тепловой режим КА.

Экспозиция полиимидных пленок на МКС, орбитальной станции «Мир», при экспериментах на КА «Space Shuttle» на высотах 350 км и ниже [2, 10, 21, 26, 29] показала, что степень эрозии образцов полимерных материалов (унос массы, уменьшение толщины пленки) пропорциональна флюенсу АК (появился термин «полиимидный эквивалентный флюенс АК»). Стендовые исследования [23—25, 30—32] свидетельствуют о том, что ВУФ усиливает действие АК, увеличивает эрозию полиимида в несколько раз. Вакуумный ультрафиолет содействует десорбции молекул CO , CO_2 , H_2O и H_2 с поверхности полиимида: энергии ВУФ-излучения достаточно для разрыва связей $\text{C} - \text{C}$, $\text{C} - \text{O}$ и функциональных групп. Полиимид инертен к воздействию ВУФ в отсутствие АК [23, 24, 31].

© В. А. ШУВАЛОВ, Н. А. ТОКМАК, Н. И. ПИСЬМЕННЫЙ,
Г. С. КОЧУБЕЙ, 2012

Соотношение потоков ВУФ/АК — ключ к количественному описанию синергетического эффекта при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета (АК+ВУФ) на высотах более 500 км, к процедуре отбора полимерных пленок — конструкционных материалов КА.

Цель данной работы — определить пороговую величину отношения ВУФ/АК, а также зависимость эрозии (уноса массы) полиимидных пленок от этой величины и спроецировать полученные результаты на условия эксплуатации пленок на высотах 200—800 км.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Атомарный кислород. Условием физического (стендового) моделирования и имитации воздействия высокоскоростного потока АК на материалы наружных поверхностей космического аппарата является равенство скоростей

$$U_M = U_H \quad (1)$$

и энергий при идентичности сорта частиц, бомбардирующих поверхность:

$$\frac{M_{AK} U_M^2}{2} = \frac{M_{AK} U_H^2}{2}, \quad (2)$$

а также интегральных флюенсов:

$$F_{AK}^{(M)} = F_{AK}^{(H)}, \quad (3)$$

или

$$\Phi_{AK}^{(M)} t_M = \Phi_{AK}^{(H)} t_H, \quad (4)$$

где индекс «М» характеризует условия физического (стендового) моделирования, «Н» — условия на орбите $U_H = 8$ км/с; $M_{AK} U_H^2 / 2 = 5$ эВ, M_{AK} — масса атома кислорода, $\Phi_{AK} = N_{AK} U$ — плотность потока АК, N_{AK} — концентрация атомов кислорода, t — время контакта газ — поверхность (время экспозиции).

Атомарный кислород в атмосфере Земли на высотах от 200 до 800 км ионизован, степень ионизации изменяется от 0.0001 до 0.1 [6].

Физико-химическое воздействие АК на материалы и покрытия КА в атмосфере Земли ха-

рактеризуют взаимосвязанные процессы обмена энергией, массой и зарядом между частицами окружающей среды и поверхностью, включая химические реакции в адсорбированном и поверхностном слоях при бесстолкновительном обтекании КА.

Положительные ионы АК с энергией от 5 до 10 эВ выполняют роль радиационно-химического активатора поверхности материала КА. Природа такого взаимодействия связана с нейтрализацией ионов, приводящей к возбуждению в полупроводниках и диэлектриках электронно-дырочных пар, достаточно долго сохраняющихся в поверхностном слое толщиной не менее 10 атомных монослоев [1]. В условиях бесстолкновительного обтекания КА потоком частично ионизованного диссоциированного кислорода в атмосфере Земли с вероятностью, близкой к единице, непосредственно с поверхностью материалов КА взаимодействует нейтральный атом кислорода с кинетической энергией иона в момент нейтрализации [15, 17]. Нейтрализация положительных ионов происходит на расстоянии нескольких диаметров иона от поверхности твердого тела. Во время нейтрализации положительных ионов происходит выделение энергии. Большая часть (2/3) энергии нейтрализации иона, согласно оценкам [17], переходит в тепловую энергию тела, 1/3 энергии нейтрализации иона расходуется на возбуждение электронов и образование дырочных структур твердого тела. Близость процессов физико-химического взаимодействия в системах «ион — твердое тело» и «нейтрал — твердое тело» подтверждается близостью значений коэффициентов аккомодации импульса и энергии, коэффициентов гетерогенной рекомбинации атомов и атомарных ионов кислорода, азота и водорода на бомбардируемых поверхностях [15, 27].

Выполнение условий (1), (3) при бесстолкновительном обтекании поверхностей твердого тела сверхзвуковым потоком частично ионизованного АК обеспечивает моделирование (или имитацию) процессов физико-химического взаимодействия материалов космических аппаратов с АК в атмосфере Земли. Моделирование условий длительной эксплуатации КА предполагает

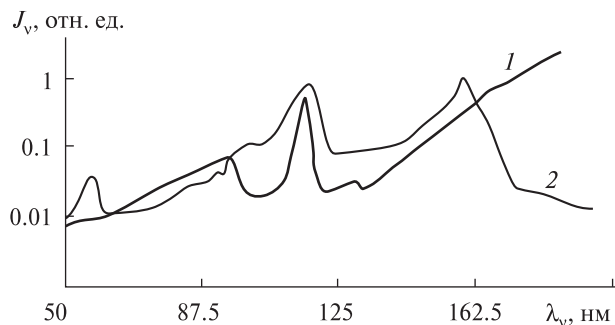


Рис. 1. Спектральное распределение вакуумного ультрафиолетового излучения [5]: 1 — солнечное излучение, 2 — излучение водородной лампы

проведение ускоренных ресурсных (стендовых) испытаний с применением более интенсивных, чем на орбите, потоков частиц. Из (4) следует

$$\Phi_{\text{AK}}^{(\text{M})} = \Phi_{\text{AK}}^{(\text{H})} \frac{t_{\text{H}}}{t_{\text{M}}} = \Phi_{\text{AK}}^{(\text{H})} K_y, \quad (5)$$

где коэффициент ускорения $K_y = t_{\text{H}}/t_{\text{M}} > 1$ — отношение длительности эксплуатации КА на орбите к длительности испытаний в форсированном режиме (в соответствии с термодинамическим критерием эквивалентности испытаний [14]), который характеризует условия приведения материала в одно и то же состояние в части накопленных повреждений.

Энтропийный критерий эквивалентности режимов эксплуатации и испытаний предполагает наличие верхних (предельных) значений нагрузок (флюенса АК) для ускоренного режима. Главное условие выбора верхних (предельных) значений нагрузок состоит в том, чтобы ускоренные испытания не приводили к изменениям в механизмах взаимодействия частиц с поверхностью, возникновению новых (отличных от условий эксплуатации) физико-химических процессов в материалах, изменению механизмов накопления повреждений. Область допустимых нагрузок при форсированных модельных (стендовых) испытаниях может быть определена условием $\Phi_{\text{AK}}^{(\text{H})} \leq \Phi_{\text{AK}}^{(\text{M})} \leq \Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})}$. Для взаимодействия потока АК с поверхностью космического аппарата это условие соответствует требованию: процессы на поверхности, инициированные одним соударением, не должны перекрываться во

времени. Согласно оценкам работы [4] для концентрации и плотности потока АК такому требованию соответствуют соотношения

$$N_{\text{AK}}^{(\text{M})} = 10^{12} \text{ см}^{-3} \text{ и } \Phi_{\text{AK}}^{(\text{M})} = 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (6)$$

Эти условия приемлемы для любого материала поверхности КА: для металлов $\Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})} \approx 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для полимерных материалов и покрытий — $\Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [4]. Таким образом, для реализации ускоренных испытаний материалов наружных поверхностей КА с целью определения их эрозионной стойкости к воздействию потока атомарного кислорода в атмосфере Земли необходимо обеспечить: наличие потока частично ионизованного АК с направленными скоростями, близкими либо равными орбитальным скоростям КА в ионосфере; режим бесстолкновительного обтекания фрагментов элементов конструкций КА или образцов испытываемых материалов газовым потоком; выполнение для параметров АК в ионосфере и на стенде соотношений (1), (3), (5) и (6). Перечисленные условия реализованы на плазмодинамическом стенде ИТМ [20].

Вакуумный ультрафиолет. Плотность потока энергии солнечного излучения — солнечная постоянная — составляет $1.4 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Примерно 0.03 % потока излучения ($0.4 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) приходится на вакуумный ультрафиолет ($\lambda_v = 10 \dots 225 \text{ нм}$). Доля солнечного ультрафиолетового излучения в диапазоне $\lambda = 10 \dots 400 \text{ нм}$ составляет 8—9 %, т. е. $126 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [11, 22, 23].

Эффекты коротковолновой области солнечного излучения удовлетворительно могут воспроизводить водородные и дейтериевые лампы, а также газоструйный имитатор ВУФ [5, 11, 19]. Эта область излучения ответственна за поверхностную деструкцию полимеров. На рис. 1 показано спектральное распределение излучений [5]. Эффект длинноволновой области солнечного спектра воспроизводится в некоторой степени только дейтериевой лампой [19].

Техника эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде ИТМ. Вакуумная камера стенда показана на рис. 2. Для генерирования сверхзвуковых потоков ионов атомарно-молекулярно-

го кислорода ($O^+ + O_2^+$) использовался газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего тела электронным ударом и осцилляцией электронов во внешнем магнитном поле. Детали постановки и проведения исследований по деградации полимерных и композитных материалов под воздействием потоков АК на стенде приведены в [20]. В статических условиях (при отсутствии потока АК) давление в вакуумной камере стенда равно 0.01 мПа, при натекании газа — около 1 мПа, т. е. условия бесстолкновительного обтекания образцов испытываемых материалов размером 50×50 мм выполняются. Изменение тока разряда плазменного ускорителя от 0.7 до 5 А позволяет получать потоки ионов АК со скоростью $U_M \approx 7.6$ км/с и концентрацией от $5 \cdot 10^{13}$ до $2 \cdot 10^{16}$ м $^{-3}$. Поверхность твердого тела, помещенного в поток разреженной плазмы, приобретает равновесный отрицательный потенциал: $\phi_W = (-kT_e/e) \ln(V_e/2\sqrt{\pi}U_i)$, где $V_e = \sqrt{2kT_e/m_e}$ — тепловая скорость, T_e , m_e — температура и масса электронов плазмы. Кинетическая энергия взаимодействия в системе «АК — полимерная пленка» $E_{AK} \approx 9.1$ эВ, а направленная по нормали к бомбардируемой поверхности скорость иона $U_{AK} \approx 9.3$ км/с. Приведенные условия позволяют при измерениях реализовать значения интегрального флюенса $10^{15} < F_{AK}^{(M)} < 10^{21}$ см $^{-2}$. Образцы испытываемых материалов крепятся на фронтальной (относительно набегающего потока) поверхности термостата. Термостат выполнен в виде двух плоских соосных дисков, покрытых тонкой пленкой диэлектрика. Наружный диск — экран с окном размером 52×52 мм. На внутреннем диске, вращающемся вокруг горизонтальной оси, параллельной вектору скорости набегающего потока, расположены четыре образца испытываемых материалов, а также плоский молибденовый зонд диаметром $d_p \approx 3.5$ мм и цилиндрический зонд — молибденовая нить диаметром $d_p = 90$ мкм и длиной $l_p \approx 5$ мм. Поверхности обоих зондов ориентированы ортогонально к вектору скорости U_{AK} . Зонды расположены в одной плоскости с образцами, позволяют контролировать флуктуации параметров потока АК посредством мониторинга ионного тока насыщения при фиксированном

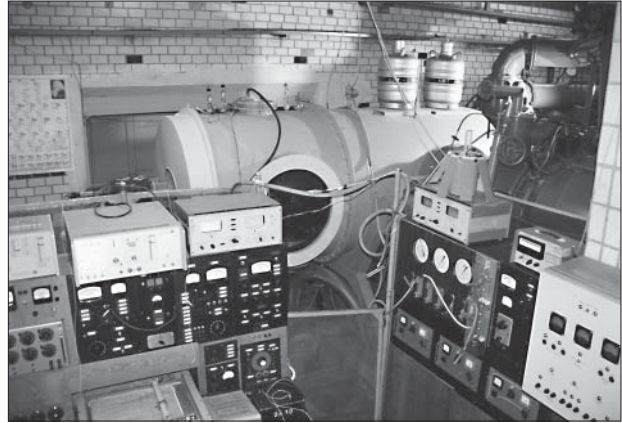


Рис. 2. Вакуумная камера плазмодинамического стенда ИТМ

потенциале зонда ϕ_p относительно потенциала плазмы ϕ_0 ($\phi_W = \phi_p - \phi_0$). Для плоского зонда ионный ток насыщения $I_{i\Sigma} = eA_p(1 + 0.4\xi_{d_i})N_{i\Sigma}U_{im}$, где e — заряд электрона, $A_p = \pi d_p^2/4$ — площадь зонда, ξ_{d_i} — степень диссоциации потока плазмы $\xi_{d_i} = N_{ia}/N_{i\Sigma} = N_{ia}/(N_{ia} + N_{im})$, индекс «a» соответствует атомарным, «m» — молекулярным ионам кислорода, U_{im} — скорость молекулярных ионов.

Для цилиндрического зонда ионный ток насыщения равен [20]

$$I_{i\Sigma} = (1 + 0.4\xi_{d_i}) \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\phi_W}{m_{im}U_{im}^2}}.$$

Параметры нейтральных и заряженных частиц потока разреженной плазмы контролировались с помощью подвижных электрических зондов, СВЧ-интерферометров, работающих на частотах 37.5 и 5.45 ГГц, зондов давления, масс-спектрометра МХ 7307 и многоэлектродного зонда-анализатора.

В качестве источника ВУФ-излучения использовались три низковольтные водородные лампы ВМФ-25, изготовленные в ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (Санкт-Петербург). Угол падения фотонов (между осью пучка ВУФ и нормалью к поверхности образца) не более 10° . Лампа ВМФ-25 создает на срезе поток ВУФ-излучения $J_{ov} \approx 80$ мВт в диапазоне длин волн от 135 до 165 нм

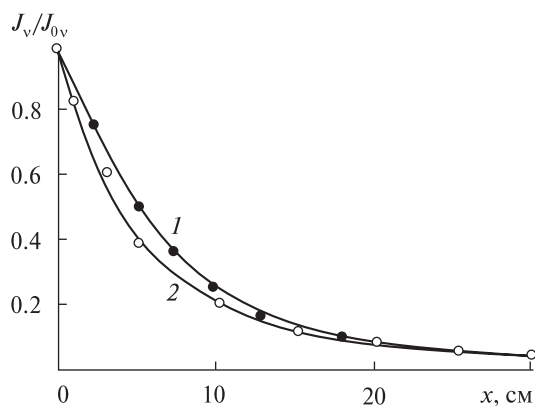


Рис. 3. Изменение потока ВУФ-излучения с расстоянием от среза: 1 — лампа ВМФ-25 (измерения ГОИ им. Вавилова), 2 — дейтериевая лампа (измерения работы [30])

с многолинейчатым спектром, а в диапазоне длин волн от 165 до 380 нм — поток излучения 10 мВт со сплошным спектром [16]. Изменение потока ВУФ-излучения $J_v(x)/J_{0v}$ с расстоянием x от среза лампы иллюстрирует рис. 3. Для сравнения на рис. 3 приведено изменение потока излучения и дейтериевой лампы из [30].

Для измерения весовых характеристик испытуемых образцов непосредственно в вакуумной камере в статических условиях использовались микровесы компенсационного типа с диапазоном измеряемых сил от 10^{-8} до 10^{-3} Н [7]. Вне вакуумной камеры до и после экспонирования использовались микровесы с погрешностью измерения не более $1 \cdot 10^{-4}$ г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно — молекулярного кислорода с полиимидной пленкой kapton-H [8, 9] свидетельствует о том, что молекулярный кислород инертен и участия в химических реакциях не принимает. Химические реакции лимитирует реакция окисления с участием окислителя АК. При этом соотношение скоростей газовой выделения продуктов химического травления — CO , CO_2 , H_2O и H_2 остается постоянным и не зависит от температуры полимерной пленки в диапазоне от 290 до 400 К и параметров разряда. Последнее также служит подтверждением, что вид частиц,

химически воздействующих на пленку, не изменяется. Это обстоятельство, а также высокая вероятность нейтрализации положительных ионов АК при соударении с поверхностью полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов позволяет при количественных оценках потери массы испытуемых образцов полиимидных пленок объединить в один ряд результаты исследований, выполненных в нейтральных потоках АК и в потоках плазмы атомарно-молекулярного кислорода.

Воздействие атомарного кислорода на полиимидные пленки. Полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э относятся к одному классу полимеров группы Н, близки по химическому составу, сходны по структуре и плотности материала $\rho \approx 1.42 \dots 1.56$ г/см³ и широко применяются в космической технике. Это обстоятельство позволяет при оценке потерь массы под воздействием потоков АК объединить результаты исследований, выполненных для этих трех полиимидных пленок в наземных условиях и в космосе. На рис. 4 приведена зависимость потери массы Δm полиимидных пленок kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э от интегрального флюенса $F_{\text{АК}}$ атомарного кислорода. Приведены не только данные измерений уноса массы $\Delta m = Y_{\text{АК}} F_{\text{АК}}$, но и результаты пересчета Δm по измерениям изменения толщины пленки $\Delta x = R_e F_{\text{АК}}$, где $Y_{\text{АК}} = \rho R_e$ — коэффициент эрозии, $R_e = 3 \times 10^{-24}$ см³/атом — объемный коэффициент потери массы kapton-H, ρ — плотность полиимидной пленки. Измеренные и пересчитанные значения Δm для полиимидных пленок хорошо согласуются между собой.

Воздействие вакуумного ультрафиолета на полиимидные пленки. Полиимидная пленка kapton-H инертна к воздействию ВУФ. Это установлено в работах [30—33] при изменении угла облучения образцов пленки от 0 до $\pi/2$ вакуумным ультрафиолетом с длиной волны $\lambda_v \approx 172$ нм при плотности потока излучения $\Phi_v \approx 4.5$ мВт/см². Практически аналогичный результат для пленки kapton-H при облучении ВУФ в диапазоне длин волн 115—200 нм получен и в работе [24].

Исследования данной работы по влиянию ВУФ на деградацию полиимидных пленок ПМ-А

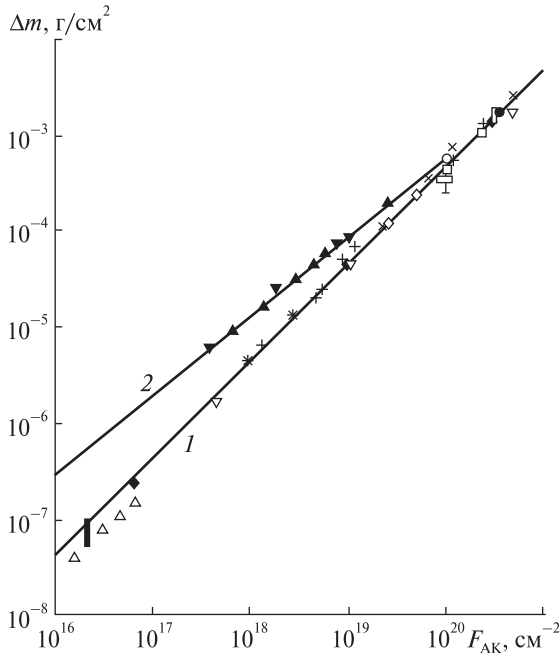


Рис. 4. Зависимость потери массы Δm полиимидных пленок от интегрального флюенса F_{AK} атомарного кислорода. *Воздействие потока атомарного кислорода:* крестики, звездочки, темные ромбики — измерения на стенде ИТМ для пленок ПМ-А, ПМ-1Э и kapton-H соответственно; *измерения для пленки kapton-H:* косые крестики — данные работы [34], треугольники — стендовые измерения в пучке атомарного кислорода [33], вертикальный отрезок — расчет по программе АТОМОХ ESA [22], темный вертикальный прямоугольник — измерения [9] в плазме, перевернутый треугольник — расчетные значения [28], ромбик — данные [13], темный квадрат и точка — измерения после экспозиции 28 и 42 месяца на орбитальной станции «Мир» [2, 10, 18, 21], квадратик, горизонтальный прямоугольник, вертикальный прямоугольник, кружок — измерения на КА «Space Shuttle» (миссии STS-4, STS-5, STS-6, STS-41 соответственно) [21, 29, 32], 1 — зависимость $\Delta m_{AK} = Y_{AK} \cdot F_{AK}$, где $Y_{AK} \approx 4.4 \cdot 10^{-24}$ г/атом; *воздействие АК+ВУФ:* темные прямые и перевернутые треугольники — измерения ИТМ на пленках ПМ-А и ПМ-1Э соответственно, кривая 2 — зависимость $\Delta m_{\Sigma} = Y_{\Sigma} \cdot F_{AK}$, где $Y_{\Sigma} = Y_0 (\eta F_{AK})^{\xi}$; $Y_0 = 5,843 \cdot 10^{-20}$ г/атом, $\eta = 1$ см², $\xi = -0.206$

и ПМ-1Э проводились в статических условиях при давлении в вакуумной камере стенда 10^{-5} Па. Изменение массы образцов при воздействии ВУФ-излучения от трех водородных ламп ВМФ-25 контролировалось непосредственно в вакууме с применением микровесов компенсацион-

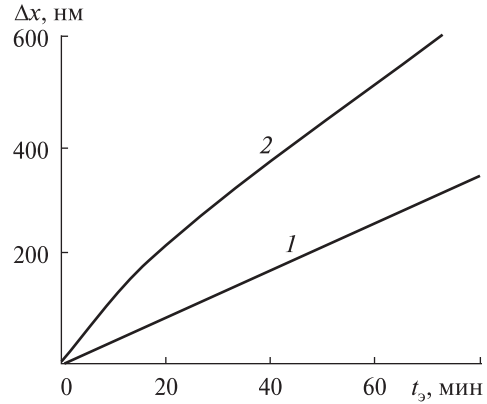


Рис. 5. Изменение толщины полиимидной пленки kapton-H при времени экспозиции $0 \leq t_3 \leq 80$ мин [24]: 1 — воздействие АК, 2 — воздействие АК+ВУФ

ного типа, а также при атмосферном давлении до и после воздействия ВУФ с помощью микровесов с погрешностью не более 10^{-4} г. Облучение образцов полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э производилось на расстоянии $x \approx 7$ см от среза ламп ВМФ-25. Плотность потока ВУФ-излучения $\Phi_v \approx 3.9$ мВт/см², время экспозиции t_3 от 30 до 120 мин. Температура поверхности образцов контролировалась по показаниям миниатюрных термодатчиков с погрешностью не более 0.5 °С. При экспозиции в потоке ВУФ-излучения температура поверхности образцов практически равна температуре массивной металлической подложки — внутреннего диска термостата ($T_w \approx 297$ К). По результатам экспериментов изменения Δm образцов полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э в пределах погрешности измерений практически не обнаружено: полиимидные пленки ПМ-А и ПМ-1Э, как и kapton-H, инертны к воздействию ВУФ-излучения.

Синергетический эффект воздействия высокоскоростного потока атомарного кислорода и ВУФ-излучения на потерю массы полиимидных пленок. Вакуумный ультрафиолет усиливает воздействие АК. На рис. 5 приведены результаты, иллюстрирующие влияние потока АК с энергией 5 эВ и $\Phi_{AK} \approx 5 \cdot 10^{15}$ см⁻²с⁻¹ и потоков АК+ВУФ в диапазоне длин волн $\lambda_v \approx 115...200$ нм при $\Phi_v \approx 1.6 \cdot 10^{16}$ фотон/см²с⁻¹ на изменение толщины полиимидной пленки kapton-H при времени экспозиции $0 \leq t_3 \leq 80$ мин (данные [24], рис. 2).

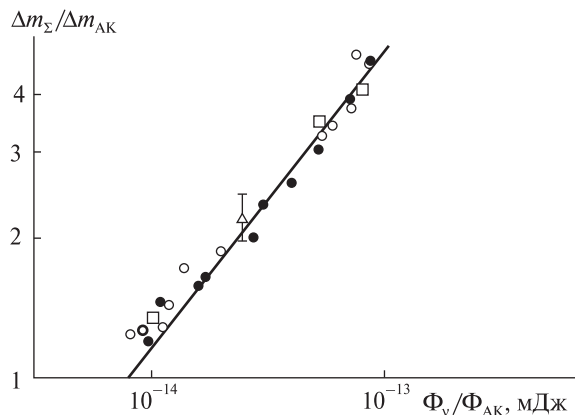


Рис. 6. Зависимость изменения массы $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$ образцов полиимидных пленок от отношения плотности потока ВУФ-излучения к плотности потока АК: точки — пленка ПМ-А, светлые кружки — пленка ПМ-1Э (измерения авторов), треугольники — данные [24] (пересчет авторов для $\Delta x_{\Sigma}/\Delta x_{AK}$ пленки картон-Н; штрихами показан диапазон изменения $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$ для временного интервала от 0 до 80 мин), квадратики — измерения [33] для пленки картон-Н

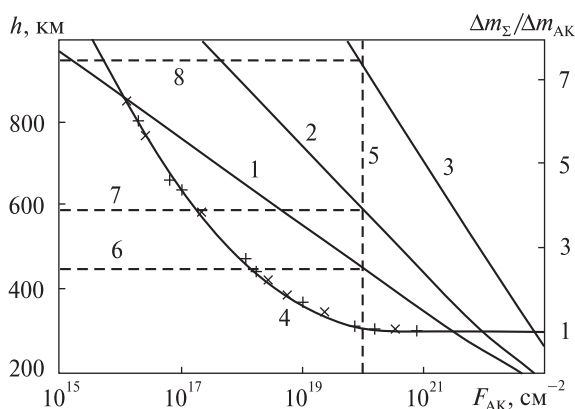


Рис. 7. Изменение уноса массы (коэффициента эрозии) полиимидных пленок в зависимости от годового флюенса АК на освещенных участках орбиты на высотах 200—1000 км при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности: прямые и косые крестики — изменение $\Delta m_{\Sigma}(F_{AK})/\Delta m_{AK}$ для пленок ПМ-А и ПМ-1Э (измерения авторов), линии 1, 2, 3 — годовой флюенс АК при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности соответственно [22], 4 — усредненные значения зависимости $\Delta m_{\Sigma}(F_{AK})/\Delta m_{AK}$, штриховая линия 5 — граничное значение $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$, штриховые линии 6, 7, 8 — области синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности

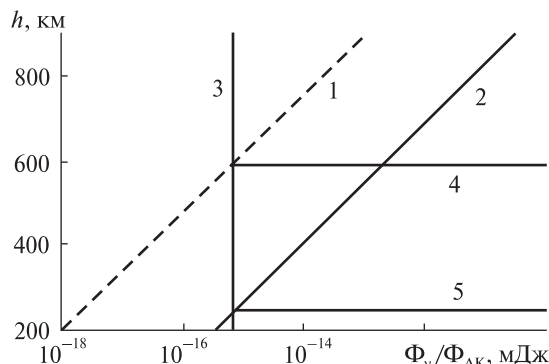


Рис. 8. Зависимость изменения отношения $\Phi_v/\Phi_{AK}(h)$: линия 1 — для ВУФ ($\lambda_v \approx 10 \dots 225 \text{ нм}$), линия 2 — для солнечного УФ-излучения ($\lambda_v \approx 10 \dots 400 \text{ нм}$) при среднем уровне солнечной активности, 3 — граничное значение $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ Дж/м}^2$, линии 4 и 5 — определяют область синергетического эффекта для АК+ВУФ ($h > 590 \text{ км}$) и АК+УФ ($h > 250 \text{ км}$)

В отличие от данных [24] (рис. 2) на рис. 5 приведены абсолютные, а не относительные изменения Δx толщины пленки. Пересчет произведен для АК при $R_e \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атом}$ с экстраполяцией значений для АК+ВУФ. Для условий эксперимента в [24] $\Delta x_{\Sigma}/\Delta x_{AK} \approx 2.0$ при $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж/м}^2$.

Зависимость изменения массы $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$ (индекс $\Sigma = \text{АК+ВУФ}$) образцов полиимидных пленок от отношения плотностей потока ВУФ-излучения к плотности потока атомарного кислорода Φ_v/Φ_{AK} показана на рис. 6. Температура поверхности пленки ПМ-А и ПМ-1Э толщиной $\delta \approx 0.04 \text{ мм}$ при измерениях в потоках АК+ВУФ изменялась от 297 до 304 К. Приведенная на рис. 6 зависимость позволяет определить пороговое значение величины $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ Дж/м}^2$ для синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на потери массы полиимидными пленками картон-Н, ПМ-А и ПМ-1Э.

Результаты измерений потери массы образцов Δm_{Σ} для полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э при воздействии (АК+ВУФ) во временном диапазоне экспозиции от 60 до 600 мин в зависимости от интегрального флюенса АК приведены на рис. 4. При воздействии только АК коэффициент эрозии пленок $Y_{AK} \approx 4.4 \cdot 10^{-24} \text{ г/атом}$. С увеличением величины интегрального флю-

енса величина Δm_{Σ} уменьшается вплоть до значений $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK} \approx 1$ при $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Это соответствует условиям проведения измерений на КА «Space Shuttle» (миссии STS — 4, 5, 6, 41) и ОС «Мир» на высотах $h < 350 \text{ км}$ [2, 10, 18, 21, 29, 32].

Зависимость изменения отношения $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK} = Y_{\Sigma}/Y_{AK}$ от годового флюенса F_{AK} на освещенных участках круговой орбиты на высотах от 200 до 1000 км иллюстрирует рис. 7. Для порогового значения интегрального флюенса $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ область синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ расположена слева от прямой линии 5. Для минимального уровня солнечной активности эта область соответствует высотам $h > 450 \text{ км}$ (выше линии 6), для среднего уровня солнечной активности — $h > 590 \text{ км}$ — стандартная атмосфера (выше линии 7), при максимуме солнечной активности — $h > 950 \text{ км}$ (выше линии 8) [22]. На высоте $h = 800 \text{ км}$ отношение коэффициентов эрозии $Y_{\Sigma}/Y_{AK} \approx 5$ — для минимума солнечной активности и $Y_{\Sigma}/Y_{AK} \approx 2$ — при среднем уровне солнечной активности.

При измерениях на МКС, ОС «Мир» и в ходе миссий КА «Space Shuttle» значения интегрального флюенса АК на освещенных участках орбиты превосходили пороговую величину $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$. По этой причине в ходе летных испытаний на МКС, ОС «Мир» и КА «Space Shuttle» изменения коэффициента эрозии образцов (потери массы) полиимидных пленок от воздействия АК и УФ-излучения не обнаружено: изменение Δm пропорционально флюенсу АК [2, 10, 21, 26, 29].

Данные рис. 7 характеризуют минимальные значения изменения $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$, так как соответствуют только коротковолновой части спектра ($\lambda_v = 10...225 \text{ нм}$) солнечного УФ-излучения.

На рис. 8 приведены зависимости $\Phi_v/\Phi_{AK}(h)$ для диапазонов $\lambda_v = 10...225 \text{ нм}$ (кривая 1, $\Phi_v = 0.4 \text{ Вт/м}^2$) и $\lambda_v = 10...400 \text{ нм}$ (кривая 2, $\Phi_v = 126 \text{ Вт/м}^2$) [12] при среднем уровне солнечной активности [22]. Область синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на полиимидные пленки расположена справа от граничной прямой 3, соответствующей значению $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ мДж}$. Точки пересечения граничной прямой 3 с ли-

ниями 1, 2 определяют области синергетического эффекта: для ВУФ — $h > 590 \text{ км}$ (линия 4) и для УФ-излучения в диапазоне $\lambda_v = 10...400 \text{ нм}$ — $h > 250 \text{ км}$ (линия 5). Отсутствие синергетического эффекта в ходе экспериментов на МКС, ОС «Мир» и КА «Space Shuttle» свидетельствует, по-видимому, о преобладающем влиянии коротковолновой части спектра солнечного УФ-излучения на унос массы и изменение толщины полиимидных пленок. Оценки областей (высот) влияния ВУФ для пороговых значений F_{AK} и Φ_v/Φ_{AK} практически совпадают. Величины $\Phi_v/\Phi_{AK} \geq 8 \cdot 10^{-15} \text{ мДж}$ и $F_{AK} \leq 10^{20} \text{ см}^{-2}$ определяют условия, при которых имеет место синергетический эффект воздействия высокоскоростного потока АК и вакуумного ультрафиолетового излучения солнечного спектра на полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э.

ВЫВОДЫ

Установлено, что полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э инертны к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения.

Определены пороговые значения отношения плотности потока ВУФ к потоку АК и годового флюенса АК, характеризующие наличие синергетического эффекта воздействия (АК+ВУФ) на унос массы полиимидных пленок — конструкционных материалов КА.

Показано, что в условиях годовой эксплуатации на освещенных участках круговой орбиты на высотах $h \leq 350 \text{ км}$ синергетический эффект воздействия (АК+ВУФ) отсутствует; на высоте $h \approx 800 \text{ км}$ при минимальном и среднем уровнях солнечной активности синергетический эффект воздействия (АК+ВУФ) может увеличивать коэффициенты эрозии полиимидных пленок в несколько раз.

1. Акишин А. И., Гужова С. К. Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов // Физика и химия обработки материалов. — 1993. — № 3. — С. 40—47.
2. Ананьева О. А., Милинчук В. К., Загорский Д. Л. Исследование односторонне алюминированных полиимидных пленок, экспонированных на орбитальной космической станции «Мир» // Химия высок. энергий. — 2007. — 41, № 6. — С. 445—451.

3. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Телепнев В. Д. Газоструйный имитатор ВУФ- и УМР-излучения Солнца и воздействие его излучения на материалы // Космічна наука і технологія. — 1998. — **4**, № 2/3. — С. 102—109.
4. Войцера В. С., Гужова С. К., Титов В. И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 224 с.
5. ГОСТ Р 25645.338-96. Материалы полимерные для космической техники. Требования к испытаниям на стойкость к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения. — Введ. 12.03.1996. — М.: Госстандарт России, 1996. — 16 с.
6. Гуревич А. В., Шварицбург А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 273 с.
7. Корн В. З., Шувалов В. А. Зондовая диагностика потока частиц, десорбируемых с поверхности твердого тела струей разреженной плазмы // Прикладная механика и техническая физика. — 1993. — № 5. — С. 144—150.
8. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Максимов А. И. и др. Исследование температурных зависимостей скоростей травления полиимидной пленки в плазме // Химия высок. энергий. — 1990. — **24**, № 5. — С. 471—474.
9. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Рыбкин В. В. Константа скорости и вероятность взаимодействия атомарного кислорода с полиимидной пленкой // Химия высок. энергий. — 1992. — **26**, № 5. — С. 475—478.
10. Милинчук В. К., Клинишонт Э. Р., Шелухов И. П. и др. Дegradация полимерных материалов на орбитальной космической станции «Мир» // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2002. — № 2. — С. 108—118.
11. Никифоров А. П., Терновой А. И., Самсонов П. В. и др. Проблемы изучения механизма взаимодействия вакуумного УФ-излучения и гипертермического атомарного кислорода (5 эВ) с полимерными материалами космических летательных аппаратов // Хим. физика. — 2002. — **21**, № 5 — С. 73—82.
12. Новиков Л. С. Современное состояние и перспектива исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой // Модель космоса: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — М.: КДУ, 2007. — Т. 2. — С. 10—38.
13. Новые наукоемкие технологии в технике: В 24 т. — М.: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2000. — Т. 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. К. С. Касаева. — 280 с.
14. Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995. — 360 с.
15. Резниченко Н. П., Шувалов В. А. Передача энергии атомарных ионов сверхзвукового потока частично диссоциированного газа поверхности твердого тела // Журн. прикл. мех. и технической физики. — 1989. — № 6. — С. 11—19.
16. Сайт ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова». Режим доступа к сайту : <http://soi.szu.ru>.
17. Филиппов Б. В. Взаимодействие газовых ионов с поверхностью тела // Аэродинамика разреженных газов. — 1967. — № 3. — С. 110—117.
18. Черник В. Н., Наумов С. Ф., Демидов С. А. и др. Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов // Перспективные материалы. — 2000. — № 6. — С. 14—20.
19. Шишацкая Л. П., Яковлев С. А., Волкова Г. А. Газоразрядные лампы для вакуумной УФ-области спектра // Оптический журн. — 1995. — № 7 — С. 72—74.
20. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Изменение свойств материалов панелей солнечных батарей КА под воздействием атомарного кислорода // Космич. исслед. — 2007. — **45**, № 4. — 224 с.
21. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., et. al. On the Degradation on Polymeric Thin Films in LEO Space Environment // Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment, Noordwijk, June 2003 (ESA SP-540). — Noordwijk: ESTEC, 2003. — P. 255—264.
22. ECSS-E-10-04A. Параметры космического пространства. — Введ. 21.01.2000. — Noordwijk: ESTEC, 2000. — 219 с.
23. Grossman E., Gouzman I. Space environment effects on polymers in low Earth Orbit // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. — 2003. — **B. 208**. — P. 48—57.
24. Grossman E., Gouzman I., Lempert G., et. al. Assessment of atomic — Oxygen flux in low-Earth orbit ground simulation facilities // J. Spacecraft and Rockets. — 2004. — **41**, N 3. — P. 356—359.
25. Koontz S., Leger L., Albyn K., Cross J. Vacuum ultraviolet radiation / Atomic Oxygen Synergism in Materials Reactivity // J. Spacecraft and Rockets. — 1990. — **27**, N 3. — P. 346—348.
26. Koontz S. L., Leger L. J., Rickman S. L., et. al. Oxygen interactions with material III — Mission and induced environments // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — **32**, N 3. — P. 475—495.
27. Krech R. H., Ganthir M. G., Caledonia G. E. High velocity atomic Oxygen / Surface Accommodation Studies // J. Spacecraft and Rockets. — 1993. — **30**, N 4. — P. 509—514.
28. Paillous A. Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO // Technol. Environment spatial. — Toulous : ESA, 1987. — P. 353—375.
29. Pippin H. G. Final report of analysis of Boeing specimens from on the effects of space environment on materials ex-

- periment. Appendix B. VA 23681 — 2199. — Hampton: NASA Langley Research Center, 2008. — P. 10—109.
30. Shimamura A., Miyazaki E. Investigation into synergistic effects of atomic Oxygen and vacuum ultraviolet // J. Spacecraft and Rockets. — 2009. — **46**, N 2. — P. 241—247.
31. Tagawa M. Atomic Oxygen-induced polymer degradation phenomena in simulated LEO. Space environments: How do polymers react in a complication space environment // Acta Astronautica. — 2008. — N 62. — P. 203—211.
32. Yokota K., Ikeda K., Tagawa M. A. Okamoto. Synergistic effect of vacuum ultraviolet on a atomic oxygen-induced erosion of fluorinated polymer // Proc. 10-th International Symp. on Materials in a Space Environment. 8th International Conf. on Protection of Materials and Structures in a Space Environment, Collioure, 2006, Noordwijk. — Noordwijk: ESTEC, 2006. — P. 127—132.
33. Yokota K., Seikyu S., Tagawa M., Ohmae N. A quantitative study in synergistic effects of atomic Oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment // Pzoc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment, Noordwijk, June 2003 (ESA SP — 540). — Noordwijk: ESTEC, 2003. — P. 265—272.
34. Zimcik D. G., Wertheimer M. R., Balmain K. B., et al. Plasma-deposited protective coating for spacecraft applications // J. Spacecraft and Rockets. — 1991. — **28**, N 6. — P. 652—657.

Надійшла до редакції 21.11.11

V. A. Shuvalov, N. A. Tokmak, N. I. Pismenny,
G. S. Kochubey

SYNERGETIC EFFECT OF ATOMIC OXYGEN FLOW AND VACUUM ULTRAVIOLET FLUX ON SPACECRAFT POLYIMIDE FILMS

We determined threshold values for the annual fluence of atomic oxygen and the ratio of the density of a solar ultraviolet vacuum flux to the density of a supersonic flow of atomic oxygen. The values characterize the synergetic effect on mass losses for polyimide films which are spacecraft structural materials.

УДК 681.785.5 : 621.383.7

В. В. Донец¹, Л. И. Муравский²

¹ Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ
E-mail: vvdonets@ukr.net; vvdonets@voliacable.com

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ

Розглянуто особливості використання лінійних і матричних приймачів випромінювання у бортових гіперспектрометрах авіаційного та космічного базування (AVIRIS першого та другого покоління, APEX, HYDICE, «Ресурс-П» та ін.) для спектрометричного дослідження земної поверхні, підсупутникової валідації спектрометричних даних, а також у компактних приладах M3 та CRISM для дослідження поверхні Місяця та Марса.

ВВЕДЕНИЕ

Растущий интерес в области дистанционного зондирования Земли из космоса для мониторинга природных ресурсов, растительного покрова и состояния посевов, разведки полезных ископаемых, предупреждения опасности, а также ряда других приложений, в том числе спектрометрического исследования поверхности других планет, требует оперативной регистрации гиперспектральных изображений. Для этого создан класс уникальных приборов — гиперспектрометров, которые базируются как на самолетах (гиперспектрометр AVIRIS [29, 44, 60] CASI [34, 50, 60], AHS [60, 75], MIVIS [60], ROSIS [58, 60, 74], HyMAP [38, 47, 58, 60], ARES [58, 79], APEX [58, 70, 75], HYDICE [63] и др.), так и на спутниках (гиперспектрометр «Hyperion» [60, 66], ARTEMIS [28], CHRIS [39, 60], PRISMA [60], EnMAP [40, 41, 52, 53, 60], «Ресурс-П» [2—4, 13, 18], M3 [33, 45, 57, 68], CRISM [33, 36, 59]).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Принципы работы бортовых гиперспектрометров базируются на одной из двух технологий

формирования и считывания аэрокосмоизображений — «whiskbroom» и «pushbroom» [1, 51, 58].

Технология «whiskbroom» (*венчиком метлы — по дорожке, поперек трека сканера*) в гиперспектральном исполнении базируется на использовании гиперспектрометра со сканером, зеркало которого осуществляет механическое сканирование анализируемого участка поверхности Земли поперек направления движения (траектории) спутника и отражает каждый элемент участка через диспергирующий узел на линейный многоэлементный сенсор, который в гиперспектрометре регистрирует один элемент (пиксел) разложенного в спектр изображения участка одновременно всеми элементами сенсора. Такая технология использовалась в гиперспектральных спектрометрах AVIRIS первого поколения [29, 44, 60], HyMapTM [33, 38, 47, 58], ARES [58, 79], DAIS [58, 76], AHS [60, 75], «Probe-1» [31] и в сканерах на борту спутников «Landsat». Сканеры, построенные на базе такой технологии, из-за наличия движущихся элементов более склонны к износу и требуют больших материальных затрат по сравнению со сканерами, построенными по технологии «pushbroom».

В технологии (конфигурации) «pushbroom» (*метлой — по курсу*) используется гиперспектрометр, в котором одновременно регистрирует-

ся линия разложенного в спектр изображения участка поверхности Земли при помощи матрицы сенсоров. Исследуемая поверхность изображается в виде последовательного набора ее полосок, зарегистрированных поперек направления движения (курса) носителя.

Гиперспектральные сканеры «pushbroom» не имеют подвижных частей, в них поперечная развертка осуществляется считыванием сигналов с линеек матричного приемника, ориентированных поперек траектории полета носителя. При этом продольная развертка обеспечивается движением летательного аппарата, на котором установлен сканер. Гиперспектральные сканеры «pushbroom», как правило, легче и дешевле, чем «whiskbroom». Это гиперспектрометры авиационного базирования AVIRIS второго поколения [46, 57, 61], APEX [58, 70, 75], HYDICE [63], CASI [50, 58, 60], CASI-2 [34, 58], ROSIS [58, 60, 74], DAIS [47, 58, 76] и гиперспектрометры, расположенные на борту спутников EO-1 («Hyperion») [60, 66], ARTEMIS [28], EnMAP [40, 41, 52, 53, 58–60].

Российские гиперспектрометры для космического аппарата «Ресурс-П» [3, 4, 13] и др. были построены по технологии (конфигурации) «pushbroom».

Недостатком таких гиперспектральных систем является неоднородность чувствительности

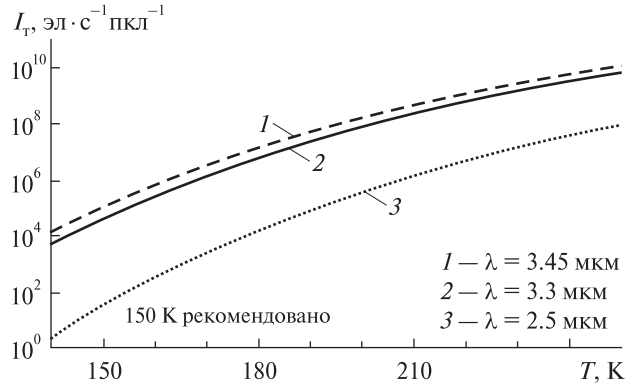


Рис. 1. Результаты измерений зависимости темнового тока I_T от температуры T матричного HgCdTe-приемника с размерами пиксела 30×30 мкм [37]

отдельных участков линейного или матричного сенсора [16]. При необходимости этот недостаток устраняется проведением специальной калибровки, при которой в память процессора вводятся поправочные коэффициенты для каждого пиксела линейного или матричного сенсора. При этом проводят также и коррекцию темнового тока сенсора. Пример результатов измерений зависимости темнового тока матричного HgCdTe-приемника с размерами пиксела 30×30 мкм от температуры (в диапазоне от 140 до 250 K) для трех длин волн (2.5, 3.3 и 3.45 мкм) [37] приведен на рис. 1.

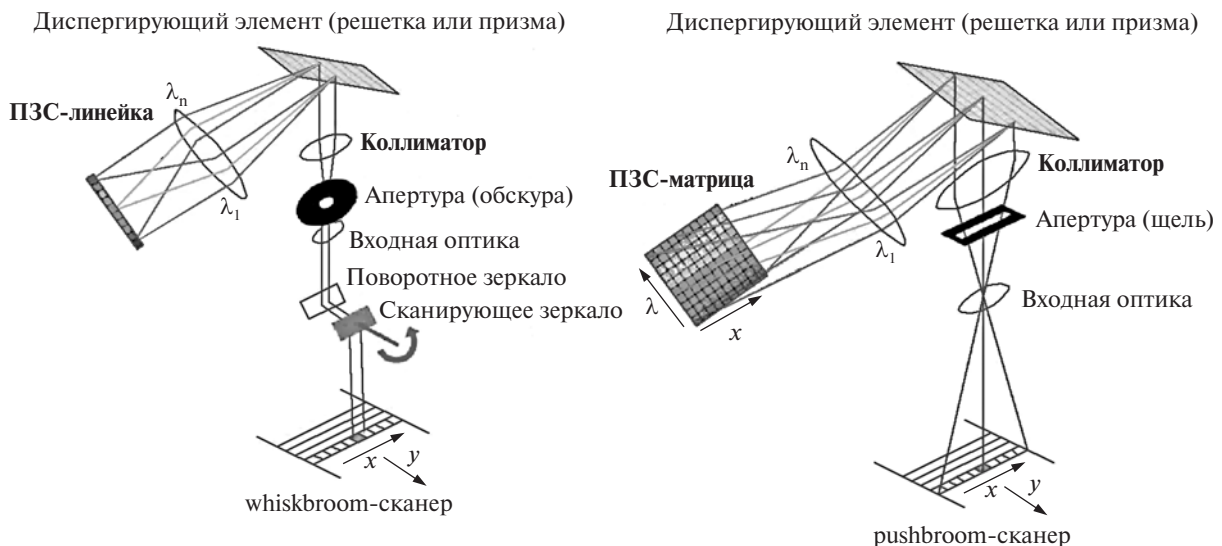


Рис. 2. Принцип действия гиперспектральных сканирующих систем типа «whiskbroom» и «pushbroom» [58]

Основные технические характеристики гиперспектральных

Авиа/космическая платформа	Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель)	Спектрометр	Конфигурация сенсора	Спектральный диапазон, нм	
АВИА ER...2, WB-57	AVIRIS-High Altitude [29, 43, 60]	4 спектрометра на дифракционных решетках	Whiskbroom, 614 crosstrack (считываний по дорожке, поперек трека сканера)	360...670 660...1280	
АВИА Twin Otter	AVIRIS-Low Altitude (США)			1260...1880 1880...2510	
АВИА Applanix 410	ARES [58, 79] (Германия)	5 дисперсионных спектрометров	Whiskbroom	470...890 890...1350 1360...1800 2020...2420 8.1...12 мкм	
АВИА Twin Otter ER-2, Proteus, Twin Otter, WB-57	AVIRISng (США) [46, 49, 57, 61, 67]	Один спектрометр на выпуклой двухзональной дифракционной решетке	Pushbroom	350...2510	
АВИА Cessna-404	HyMAP (Австралия) [33, 38, 47, 58]	4 спектрометра на дифракционных решетках	Whiskbroom, 512 crosstrack (биконическая)	450...2500	
АВИА Do228, Twin Otter, Short SC7, Falcon F20	APEX [62, 69, 70, 75] (Германия, Бельгия, Швейцария)	Два спектрометра на дисперсионных призмах	Pushbroom	380...970 940...2500	
КА SLV VEGA, DNEPR, ROCKOT	EnMAP [40, 41, 52, 53, 60] (Германия)	Два спектрометра на дисперсионных бипризмах	Pushbroom	420...1000 900...2450	
Авиа CASA 212-200	AHS [60, 75] (Бельгия)	Дихроичные фильтры и четыре дифракционных спектрометра на решетках	Whiskbroom 750 пиксел на линию	430...1030 1550...1750 1994...2540	
КА	ARTEMIS [28] (США)	Один спектрометр на выпуклой двухзональной дифракционной решетке	Pushbroom	3.3...5.4 мкм 8.2...12.7 мкм 400...2500	
АВИА	ROSIS-03 [58,60,74]	Автоколлимационный спектрометр на плоской дифракционной решетке	Pushbroom	430...860	

систем космического, авиационного и наземного базирования

Количество спектральных каналов	Спектральное разрешение, нм	Частота кадров (время интеграции)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
224	9.7 9.5 10.0 10.0	12 (87.5 мкс)	н/д, 12 бит н/д, 12 бит н/д, 12 бит н/д, 12 бит	Линейка — 32 элемента (Si) Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из Si / InGaAs Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из антимонида индия (InSb) Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из антимонида индия (InSb)
28 29 29 29 30	15...16 14...16 15...17 13...16 115...130	10...25 лин/с	14...16 бит	Охлаждаемые линейки Si (VIS), InSb (NIR и SWIR) и HgCdTe (TIR).
228	5	10...100	КМОП Teledyne TCM6604A [30, 49, 67]	HgCdTe — 140 K, 640 × 480, 4 выхода, Ширина пикселя 27 мкм (используется 640 × 271)
126	13...17	10	н/д 16 бит	4 линейки по 32 элемента (одна — Si и три InSb, с охлаждением 77 K
114	0.6...6.3	20...40	CCD 55-30 from E2V Technologies (GB)	1252 × 1152 пикселей (используется 1000 × 393) Размер пикселя 22.5 × 22.5 мкм
199 (221)	13.5...7		1000x256 SWIR FPA (CMOS, Sofradir, France)	HgCdTe — 130...165 K с сапфировым окном, 1000 × 256 пкл Размер пикселя 30 мкм
94 155 (134 рабочих)	6.5 10	230 Гц (4.4 мс)	— —	Низкая чувствительность к поляризации
20 1	30 200	12.5...35 Гц	12 бит	Линейка из кремния (Si) Охлаждаемая линейка из антимонида индия (InSb)
42	13			Охлаждаемая линейка из антимонида индия (InSb)
7	300			КРТ
10	400			Охлаждаемая КРТ линейка
400	5	—	н/д	HgCdTe с охлаждением
115	4	30...35 Гц	Thomson THP 7895, THX7895 (с охлаждением)	552 × 516 пикселей (используется 512 × 115) Размер пикселя 19 × 19 мкм

Авиа/космическая платформа	Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель)	Спектрометр	Конфигурация сенсора	Спектральный диапазон, нм	
АВИА Do 228	DAIS 7915 [58, 76]	Автоколлимационный спектрометр на плоских дифракционных решетках	Whiskbroom	400...1000 1500...1800 2000...2500 3.0...5.0 мкм 8.0...12.6 мкм	
Авиа	AISA ID 1710 1996 [26], (Финляндия)	Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)	Pushbroom	400...1000	
	AISA Eagle [26], (Финляндия)	Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)	Pushbroom	400...970	
	AISA Hawk [26], (Финляндия)	Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)	Pushbroom	970...2450	
	AISA Dual [26], (Финляндия)	Два спектрометра с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)	Pushbroom	400...970 970...2450	
АВИА King Air C90A	CASI-2 (Канада) CASI-550 (Канада) CASI-1500 (Канада)	Спектрометры на дифракционных решетках [34, 50, 60]	Pushbroom	405...950 400...1000 0.38...1.05	
КА «Ресурс-П»	ГСА для КА «Ресурс-П» (Красногоровский ОМЗ, Россия) [4, 5, 6, 13, 18]	Спектрометр на дисперсионной призме [5, 6]	Pushbroom	400...650 630...1000	
АВИА	ЗАО НПО ЛЕПТОН (Россия) [15]	Спектрометр на дисперсионной призме	Pushbroom	395...929	
АВИА Ан-2	Бортовой видеоспектрометр (БВС) СОКОЛ-ГЦП (Россия) [1, 2]	Спектрометр на дисперсионной призме	Pushbroom	530...950	
КА «Астрогон» и АВИА	НТЦ «Реагент» (Россия) [20]	Гиперспектральная видеокамера	Pushbroom	450...900	
Наземный полевой спектрометр	ImSpector V8 [71] (Финляндия)	Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)	Pushbroom	380...780	

Продолжение табл.

Количество спектральных каналов	Спектральное разрешение, нм	Частота кадров (время интеграции)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
32	15...30	6...24 Гц	15 бит	Линейка 512 элементов (Si)
8	45			Линейка 32 элемента из антимонида индия (InSb)
32	20			Линейка 32 элемента из антимонида индия (InSb)
1	2 мкм			Антимонид индия (InSb) — одна площадка
6	0.9 мкм			КРТ
244	2.3	—	Thomson TH7863	288 × 384 пкл (используется 1000 × 393) Размер пикселя 23 × 23 мкм
(126-программно)				
488	2.9	—	CCD камера 12 бит	—
254	8.5	—	МТС камера 14 бит	—
244	2.9	—	CCD камера 12 бит	—
254	8.5	—	МТС камера 14 бит	—
288	1.8...2.2	—	512 пикселей по спектру, 14 бит	Программируется до 18 спектральных каналов
288	1.9	—		(используется 500 пикселей по спектру)
288	< 3.5 (2.3)	—		(используется 1500 пикселей по спектру)
≥ 50	5...7	—	Матричные ФПЗС ВЗН-типа	С охлаждением
≥ 50	5...7	—	формата 1024 × 256	
290	0.34...13.0	—	KODAK KAI-4021 12 бит	2048 × 2048 пикселей Размер пикселя 7.4 × 7.4 мкм Размер 16.67 × 16.06 мм Матрица без охлаждения
105 (70...75)	4.6...7.1	25...50 Гц	ФПЗС-камера 3.2 × 16 мм Размер элементов 16 × 16 мкм	Размер кадра 200 × 1040 или 105 × 1040
250	—	—	матрица IBIS-5.	—
80	5	170 для 4 спектр. каналов и 90 для 16 спектр. каналов	Спектральная камера SpeCam 12 бит	384 (по спектру) × 288 (по пространству)

Авиа/космическая платформа	Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель)	Спектрометр	Конфигурация сенсора	Спектральный диапазон, нм
Наземный полевой аппаратно-программный спектрометрический комплекс	Проект 2416 УНТЦ [9, 14, 72] (Украина)	Спектрометр на плоской дифракционной решетке	Pushbroom (один кадр, суммирование по столбцу)	520...820
АВИА и КА	Probe 1 [31, 60] США	—	Whiskbroom 512 crosstrack (считываний по дорожке, поперек трека сканера)	440...2430
Микроспутник PROBA	CHRIS (ESA's) [39, 60]	Спектрометр на дисперсионных призмах	Pushbroom	415...1050
АВИА (Китай)	PHI-1 [73]	Спектрометр на отражающей дифракционной решетке	Pushbroom 376 пкл на линию	400...800
	PHI-2 [73]	Спектрометр на пропускающей дифракционной решетке	Pushbroom 652 пкл на линию	400...870
	PHI-3 [73]	Спектрометр на пропускающей дифракционной решетке	Pushbroom 1304 пкл на линию	410...980
КА 2011	HyspIRI VSWIR (США) [45, 77]	Спектрометр на двухзональной выпуклой дифракционной решетке	Pushbroom	380...2510 (VSWIR)
КА на Марс	CRISM (США) [33, 36, 59]	—	Pushbroom	3...12 мкм (TIR)
		Два спектрометра на выпуклых двухзональных дифракционных решетках		362...1053 1002...3920
КА на Луну 2008	Moon M3 США-2008 [33, 45, 57, 68]	Спектрометр на выпуклой трехзональной дифракционной решетке	Pushbroom	430...3000

Основными рабочими параметрами гиперспектрометров являются:

- рабочий спектральный диапазон,
- количество спектральных зон и спектральное разрешение,
- пространственное разрешение,
- угол зрения (обзора),
- отношение сигнал/шум,
- динамический диапазон,
- разрядность цифровых данных,
- производительность (скорость записи информации и ее объем) и др.

Оптические схемы гиперспектрометров, построенных по технологиям «whiskbroom» и «pushbroom», приведены на рис. 2.

В таблице приведены основные технические характеристики известных гиперспектральных систем космического, авиационного и наземного базирования.

Основными узлами гиперспектрометров являются:

- входная оптическая система (как правило, телескопическая), со сканером или без него;

Окончание табл.

Количество спектральных каналов	Спектральное разрешение, нм	Частота кадров (время интеграции)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
≥150	2	Единичный пуск	Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS [54] 10 бит	Матрица с внутренним АЦП, без охлаждения 1280 × 1024 пкл (используется: 1024 × 520 — измерительный канал; и 1024 × 334 — опорный канал) Размер пикселя 6 × 6 мкм
128	12...16	—	н/д 11 бит	—
19 (при 25 м) 37 (при 50 м)	1.3...12	12.7 мс	CCD 25-20 from E2V Technologies (GB) 12 бит	1152 × 780 пкл Размер пикселя 22.5 × 22.5 мкм
244	< 5	—	CCD-камера 12 бит	Приемник без охлаждения
247	< 5	—	CCD-камера 14 бит	Охлаждаемый приемник
124	< 5	—	CCD-камера 14 бит	Охлаждаемый приемник
—	10	10...100	КМОП Teledyne TCM6604A 14 бит	HgCdTe — 140 К, 640 × 480, 4 выхода, Ширина пикселя 27 мкм
8	—	—	HgCdTe	—
—	6.55 нм/канал	1...30 Гц	Кремниевая ПЗС 14 бит Teledyne TCM6604A [30, 49, 67] 14 бит	Охлаждение тремя криокулерами: (двух приемников и прибора) Длинноволновая граница приемника 4050 нм
261	10	—	Teledyne TCM6604A [30, 49, 67] 14 бит	HgCdTe — 140 К, используется 640 × 261 пикселей

- полихроматор, с входной щелью на входе, диспергирующим элементом и фотоприемником на выходе;

- электронные блоки управления, обработки и хранения информации.

Большинство полихроматоров выполнены с диспергирующим элементом на основе дифракционных решеток [25, 26, 28, 29, 43, 46, 50, 57, 58, 60, 61, 66, 74], работающих как на отражение, так и на пропускание [25, 26].

Часть гиперспектрометров, разработанных с участием европейских, в том числе и россий-

ских, специалистов, выполнена с призмными полихроматорами [2, 40, 41, 52, 53, 70, 75]. Есть также бортовые гиперспектрометры, использующие статические фурье-спектрометры [17, 21].

Небольшая часть гиперспектрометров использует и другие способы получения информации об интенсивности монохроматических составляющих анализируемого изображения, на основе, например, оптико-акустических фильтров [32, 43] и электронно-перестраиваемых фильтров на жидких кристаллах [32, 43].

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ

В бортовых гиперспектрометрах используются линейные и матричные сенсоры. Первые используются в приборах, имеющих технологию (конфигурацию) формирования и считывания аэро- и космоизображений — типа «whiskbroom». При этом съем информации поперек направления движения осуществляется благодаря использованию механического сканера — AVIRIS, ARES, NuMAP, DAIS [29, 38, 44, 46, 60, 76, 79].

В бортовых гиперспектрометрах аэро- и космоизображений, имеющих технологию (конфигурацию) формирования и считывания типа «pushbroom», используются матричные сенсоры [2, 18, 28, 34, 40, 41, 46, 50—53, 58, 60, 61, 63, 66, 70, 74, 75].

Приемниками излучения в бортовых гиперспектрометрах могут быть:

- линейные и матричные ПЗС (приборы с рядовой связью);
- КМОП-приборы, т. е. КМОП-линейки и КМОП-матрицы, созданные по технологии построения электронных схем «комплементарный металл — оксид — полупроводник» (КМОП).

Сравнительный анализ ПЗС- и КМОП-сенсоров.

К началу нынешнего столетия стало очевидным [23], что матричные ПЗС-сенсоры по сравнению с КМОП-сенсорами обеспечивают лучшие показатели при съемке динамичных и мелких объектов, поэтому их использование для построения систем, требующих высокого качества изображения (цифровых фото- и видеокамер, медицинского оборудования и т. д.), было более предпочтительным. Матричным КМОП-сенсорам же отводилась ниша устройств, для которых критична конечная стоимость (недорогие фотоаппараты, бытовая, офисная техника и игрушки).

Опыт производства, накопленный за годы развития КМОП, позволил с каждым новым поколением этих сенсоров существенно снижать фиксированные и случайные шумы, влияющие на качество изображения. Еще одно слабое место КМОП — искажения, появляющиеся при захвате динамического изображения вследствие слабой чувствительности сенсора. В современных устройствах их удается избежать, а захват

изображения без особых артефактов возможен со скоростью 15—30 кадров/с, и уже 0.3-мегапиксельные КМОП-сенсоры фактически избавлены от этой проблемы.

Однако победа в конкуренции технологий, скорее всего, лежит в плоскости уменьшения площади пиксела. Для успеха на рынке мегапиксельных сенсоров при диагонали 1/4 дюйма площадь пиксела должна составлять не более 3 мкм². При всех усилиях производителей КМОП удовлетворить таким требованиям они пока не могут, поэтому, как считают эксперты, по крайней мере в ближайшее время в данной нише будет господствовать ПЗС.

В работе [65] приведены сравнительные характеристики некоторых ПЗС-матриц, используемых в мировом оптико-электронном приборостроении.

Проведем короткий сравнительный анализ ПЗС- и КМОП-матриц.

Преимущества ПЗС-матриц:

- низкий уровень шумов,
- высокий коэффициент заполнения пикселей (около 100 %),
- высокая эффективность (отношение числа зарегистрированных фотонов к их общему числу, попавшему на светочувствительную область матрицы, для ПЗС — 95 %),
- высокий динамический диапазон (чувствительность).

Недостатки ПЗС-матриц:

- сложный принцип считывания сигнала, а следовательно и технология,
- высокий уровень энергопотребления (до 2—5 Вт),
- дороже в производстве.

Преимущества КМОП-матриц:

- высокое быстродействие (до 500 кадров/с),
- низкое энергопотребление (почти в 100 раз меньше по сравнению с ПЗС).
- дешевле и проще в производстве,
- перспективность технологии (на том же кристалле сравнительно легко реализовать все необходимые дополнительные схемы: аналого-цифровые преобразователи, процессор, память, получив, таким образом, законченную цифровую камеру на одном кристалле. Производством

такого устройства с 2002 г. занимаются совместно «Samsung Electronics» и «Mitsubishi Electric»).

Недостатки КМОП-матриц:

- низкий коэффициент заполнения пикселей, что снижает чувствительность (эффективная поверхность пикселя 75 %, остальное занимают транзисторы),
- высокий уровень шума (он обусловлен так называемыми темновыми токами — даже в отсутствие освещения через фотодиод течет довольно значительный ток), борьба с которым усложняет и удорожает технологию,
- невысокий динамический диапазон.

Примеры использования КМОП- и ПЗС-сенсоров в бортовой аппаратуре. Возможность совмещения на одном КМОП-кристалле функций приема и обработки изображений позволило создавать новую элементную базу для специальных применений, в том числе и для космической аппаратуры [8].

Видеосистема на основе цифрового КМОП приемника впервые была установлена в 1997 г. на КА «Arian 502» Европейского космического агентства, где успешно использовалась для наблюдения за процессом разделения спутников. Затем она была доработана для космического аппарата, который в 2003 г. полетел на Марс.

По заказу Европейского космического центра фирмой «Fill Factory» был разработан специальный КМОП-приемник для космической аппаратуры. Помимо фотоприемной секции на кристалле сформированы 10-бит АЦП, усилители, схемы ДКВ, схема поиска требуемого фрагмента изображения и гамма-корректор. Данные вводятся последовательно. Формат приемника — 1280×1024 пкл (1.3 Мпкл) размером 7×7 мкм, частота кадров — 10 с^{-1} , динамический диапазон — 76 дБ, напряжение питания — 5 В. Приемник может воспринимать как черно-белое, так и цветное изображение. Он характеризуется повышенной радиационной стойкостью и отвечает требованиям класса жесткости для космических применений. КМОП-приемники нашли применение в системе космической ориентации и звездных датчиках [22].

Фирмой «Cypress» созданы быстродействующие КМОП-приемники LUPA-1300 [55] и

LUPA-4000 [56] с прогрессивной разверткой и 16 аналоговыми выходами, что позволяет получить максимальную частоту кадров — 450 с^{-1} . Формат матрицы LUPA-1300 — 1280×1024 пкл размером 14×14 мкм, а матрицы LUPA-4000 — 2048×2048 пкл размером 12×12 мкм. Камера LUPA-1300 сформирована на кристалле размером 19.2×16.2 мм, монтируемом в 145-выводной корпус, а камера LUPA-4000 — на кристалле 24.6×24.6 мм, монтируемом в 127-выводной корпус. Приемники LUPA-1300 и LUPA-4000 нашли применения в современных приборах с цифровыми камерами. Так, например, в совместном белорусско-германском предприятии «Проскан Специальные инструменты» на базе матрицы LUPA-4000M создана система регистрации изображений [42], работающая в составе спектральных оптических приборов в диапазоне длин волн 400—1100 нм. Именно эти серии матричных приемников (LUPA-1300, LUPA-4000) [55, 56] и использовались при создании оригинальных оптико-электронных приборов и гиперспектрометров [7, 12, 42].

Сравнение КМОП и ПЗС показывает, что КМОП, работающие в видимом и ближнем ИК-диапазонах, уступают ПЗС по разрешающей способности, фоточувствительности, однородности и динамическому диапазону [8]. Поэтому космическую оптоэлектронную аппаратуру дистанционного зондирования Земли, высокоточные системы технического зрения, астрономическое, медицинское и биологическое оборудование предпочтительнее строить на основе ПЗС. Поскольку КМОП имеют свои преимущества, то это позволяет их также использовать в современных конструкциях бортовых оптико-электронных приборов, в частности гиперспектрометрах [7, 12, 19, 41, 56].

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ ЛИНЕЙНЫХ И МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Информация о разработке и производстве ПЗС-приборов приведена в работах [10, 11, 49, 78], а применение (включая калибровку) линейных и матричных приемников в составе оптико-электронных сканерах различного типа аэрофото-

снимков и спутниковых фотографий описаны в работах [8, 27, 49, 78]. Применение линейных и матричных приемников излучения в бортовых и полевых гиперспектрометрах имеет свои особенности, некоторые из них указаны ниже.

В гиперспектрометре AVIRIS, который имеет технологию формирования и считывания аэро- и космоизображений типа «whiskbroom», использованы четыре (сопрягаемые по спектру) спектрометра с индивидуальными охлаждаемыми жидким азотом (77 К) ПЗС-линейками из кремния, индия-галлия-арсенида и антимонида индия соответственно [29, 44, 60]. Спектральное изображение исследуемого пиксела на входной поверхности линеек каждого из спектрометров ориентировано вдоль направления движения носителя. При этом съем информации поперек направления движения осуществляется путем механического сканирования по второй координате.

В гиперспектрометре AVIRISng-AVIRIS нового поколения [46, 49, 57, 61, 67], в котором использована более совершенная технология формирования и считывания аэро- и космоизображений типа «pushbroom», применен один высококачественный (с перекрытием всего рабочего широкого спектрального диапазона) матричный охлаждаемый приемник излучения (сенсор) типа TSM6604A [30, 33, 45, 49, 67, 68], выполненный на основе полупроводникового соединения КРТ (кадмий-ртуть-теллур). В качестве охладителя используется миниатюрный кулер — криоохладитель.

Уникальность этого инфракрасного материала для сенсора (HgCdTe) состоит в том, что его ширина запрещенной зоны, которая зависит от смеси ртути и кадмия, может быть настроена в широком диапазоне, примерно от 0.1 до 1 эВ и более. В соединении HgCdTe , описанному как $\text{Hg}(1-x)\text{Cd}(x)\text{Te}$, где атомы теллура составляют 50 %, а оставшаяся половина состоит из смеси ртути и кадмия (при $x = 1$ остается CdTe). Длинноволновая граница, при которой начинает работать полупроводниковый сенсор, обратно пропорциональна ширине запрещенной зоны. При комбинировании концентрации ртути и кадмия, что достигается технологией молеку-

лярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), появляется возможность обрезания длинноволновой границы сенсора в диапазоне от 1.7 до 16.5 мкм. С использованием технологии МЛЭ смеси Hg , Cd и Te , а также дополнительные примеси можно точно контролировать. Этот метод «инженерной запрещенной зоны» позволяет растить сложные структуры в слое КРТ, которые обеспечивают высокий уровень производительности [49], в частности, при изготовлении универсального сенсора TSM6604A [30, 49, 67].

Этот уникальный охлаждаемый матричный приемник излучения TSM6604A был применен также в компактных спектрометрах типа M3 Spectrometer для исследования поверхности Луны [30, 33, 45, 67, 68] и CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) для исследования поверхности Марса [33, 36, 59]. Наличие одного широкодиапазонного приемника (TSM6604A) в выходной плоскости спектрометра, выполненного на базе дифракционной решетки и имеющего наложение спектров высших порядков, стало возможным благодаря использованию уникального (как по конструкции, так и по однородности спектральных параметров по двум координатам в рабочей зоне и по ее размерам) интерференционного клиновидного отрезающего спектроразделительного фильтра перед приемником. Серии близких по конструкции (но предназначенные для работы только по одной координате) клиновидных фильтров для линейных ПЗС изготавливаются фирмой «Ocean Optics» (США) под шифром серии — LVF (Linear Variable Filters) [64].

В гиперспектрометре APEX [62, 69, 70, 75] в двух призматических полихроматорах, которые сопряжены с одним общим входным оптическим устройством, используются два типа матричных сенсоров:

- неохлаждаемый кремниевый ПЗС-приемник типа CCD 55-30 с размером пикселей 22.5×22.5 мкм (1252×1152 пкл, из которых используется зона 1000×393 пкл), производства фирмы «E2V Technologies» (GB), работающий в спектральном диапазоне 0.38—1.0 мкм;
- охлаждаемый парами азота с помощью микрокулера Стирлинга до температуры 130—165 К

КРТ (HgCdTe) КМОП-приемник типа 1000×256 SWIR FPA, производства фирмы SOFRADIR (F), работающий в спектральном диапазоне $0.94\text{—}2.5$ мкм, имеющий размеры пикселей 30×30 мкм.

В гиперспектрометре HYDICE [24, 35, 63]:

- применение одного широкополосного матричного фотоприемника из антимонида индия, производства «Hughes Santa Barbara Research Center» (USA) с размером каждого пиксела 40×40 мкм. В этом приемнике применяется «холодный фильтр» (SP28 cold filter [48]), охлаждаемый до 65 К, чем было достигнута возможность сдвига кривой спектральной чувствительности в фиолетовую область спектра, обеспечив при этом работоспособность в спектральном диапазоне $400\text{—}2500$ нм с минимально возможными шумами (рис. 3).

- для учета энергетических различий в разных частях видимого и коротковолнового ИК-спектра матрица разделена на три области ($400\text{—}1000$, $1000\text{—}1900$ и $1900\text{—}2500$ нм) с разными коэффициентами электронного усиления [24, 35].

Гиперспектральная аппаратура для КА «Ресурс-П». За основу построения гиперспектральной аппаратуры (ГСА) для КА «Ресурс-П» [2—4, 13, 18] по совокупности критериев сравнения в ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» использована классическая схема спектрографа на основе диспергирующего призмного устройства [3, 4]. В каждом из каналов были применены оригинальные охлаждаемые трехканальные матричные ПЗС, работающие в режиме ВЗН (режим временной задержки и накопления) [13] формата 1024×256 пкл [4], созданные компаниями ЗАО НПП ЭЛАР — ЗАО НПП СИЛАР (г. Санкт-Петербург, Россия) [10, 11] специально для этой ГСА с размерами ячейки пиксела в три раза больше, чем в панхроматическом канале. Конструкция фотоприемной ячейки этих матриц обеспечивает расширенный в синюю область диапазон чувствительности [13].

Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП». В рамках Федеральной целевой Программы «Комплексные меры противодействия злоупотребления наркотикам и их незаконному обороту на 2005—2009 годы» ФНЦП ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» разработал и изготовил

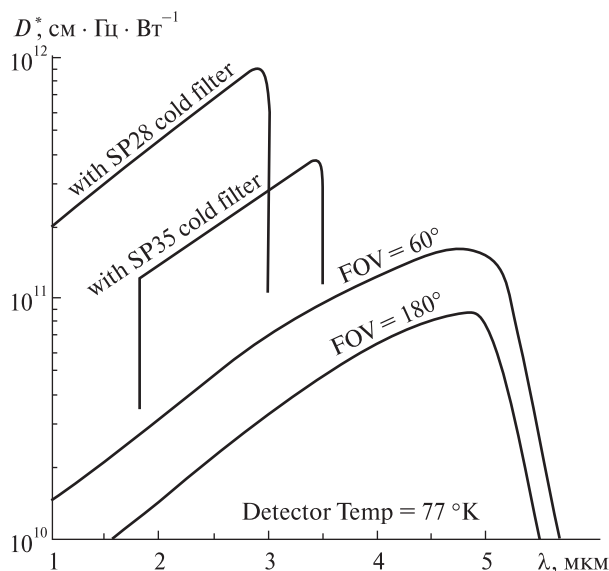


Рис. 3. Спектральная обнаружительная способность D^* фотоприемников из антимонида индия с применением «холодных фильтров» (SP28 cold filter и SP35 cold filter [48])

экспериментальный образец бортового видеоспектрометра (БВС) «Сокол-ГЦП» [5, 6] для использования в составе авиационно-технического комплекса ФГУП «Госцентр «Природа». БВС работает в режиме «pushbroom» и выполнен по схеме дисперсионного спектрометра. При этом получено неискаженное изображение спектра входной щели на строках ПЗС-матрицы, а направление дисперсии строго согласовано с направлением столбцов ПЗС.

Бортовой видеоспектрометр предназначен для получения изображения поверхности Земли в 75 спектральных диапазонах (в интервале длин волн $530\text{—}950$ нм со спектральным разрешением около 5 нм с аналогово-цифровым преобразованием и предварительной обработки гиперспектральной видеoinформации (ГВИ). Для этой конструкции использована ПЗС-матрица с размером чувствительного элемента 3.2×16.6 мм. Размер элементов (пикселей) составляет 16×16 мкм. Размер кадра — 200×1040 пкл (при частоте кадров около 25 Гц), с учетом бинирования строк — 105×1040 пкл (при частоте кадров около 50 Гц). Число спектральных каналов — 105, спектральное разрешение БВС в целом составляет $4.6\text{—}7.1$ нм.

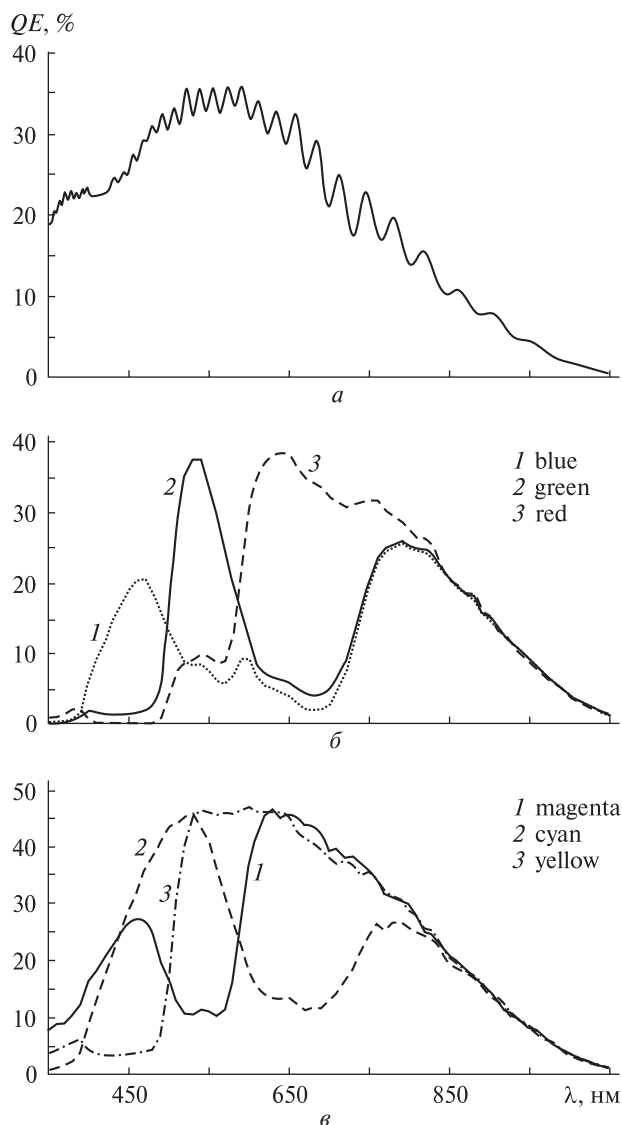


Рис. 4. Спектральная чувствительность и квантовый выход (QE) трех модификаций матрицы «Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS» [54]

Из-за нелинейности дисперсии оптических материалов призм спектральное разрешение прибора в длинноволновой области спектра превышает разрешение в коротковолновой области примерно в десять раз. При заданном для БВС уровне спектрального разрешения в длинноволновой области, разрешение в коротковолновой области спектра оказывается избыточным (<0.7 нм). Этот недостаток успешно исправляется при регистрации ин-

формации за счет использования нелинейного аналогового бинирования строк ПЗС.

Проект УНТЦ 2416 [9, 14, 72]: применен один матричный КМОП-фотоприемник «Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS» [54], имеющий внутренний 10-битный АЦП) для одновременной регистрации двух информационных полей — измеряемого и опорного, как двух изображений в одном кадре. Одновременно используется прием для увеличения как чувствительности, так и соотношения «сигнал — шум» путем суммирования по столбцам; при этом полезный сигнал возрастает в N раз, а шум — в $\sqrt{N}$ раз (так как это чисто фотонный шум, остальными шумами можно пренебречь). Темновой ток регистрируется отдельно в аналогичных условиях, но при закрытом затворе.

Матрица KAC-1310 [54] имеет три модификации спектральной чувствительности (см. рис. 4): монохромная (а) и два типа цветных матриц — RGB (б) и CMY (в), что удобно при конструировании гиперспектральной аппаратуры разного типа и назначения.

Приборы для исследования поверхности Луны и Марса. Для спектрометрического исследования поверхности Луны в NASA (США) создан компактный гиперспектрометр типа M3 Spectrometer [33, 45, 57, 68]. Он оригинальный по своей конструкции, выполнен в виде компактного внеосевого оффнер-спектрометра, имеющего сложную двухзональную выпуклую дифракционную решетку и один охлаждаемый матричный КРТ-сенсор типа TCM6604A фирмы «Teledyne» (США) [30, 49] (640×480 пкл), изготовленный на базе архитектуры КМОП, с трехзонным ИК-фильтром для отрезания трех порядков спектра и полосовой выборки в диапазоне $0.4\text{--}3.5$ мкм (рис. 5) [49]. Охлаждение сенсора в гиперспектрометре M3 до температуры 150 К производится с помощью одного криокулера K508 фирмы «Ricor».

Для гиперспектрометрического исследования поверхности Марса предназначен компактный спектрометр типа CRISM [33, 36, 59]. Он тоже оригинален по своей конструкции, выполнен в виде одного 100-мм телескопа, спектроделителя и двух компактных спектрометров (видимого и

ИК-диапазонов). Каждый из этих спектрометров имеют двухзональную дифракционную решетку и охлаждаемый матричный сенсор. На каждой дифракционной решетке одна зона оптимизирована для более коротких длин волн, а вторая — оптимизирована для более длинных волн.

В первом спектрометре (*VNIR*-диапазона) кремниевый матричный сенсор (рис. 6) работает в области спектра 362 — 1053 нм, а во втором, в ИК-диапазоне, в интервале длин волн 1002—3920 нм, используется матричный КРТ-сенсор (рис. 7) типа TSM6604A 640 × 480 пкл с 3-зонным ИК-фильтром для отрезания трех порядков спектра. Длинноволновая граница этого приемника — 4050 нм [59].

Охлаждение кремниевого сенсора (*VNIR*-диапазона) до температуры 213 К позволяет сохранять квантовую эффективность при длинах волн более 900 нм. Охлаждение КРТ-сенсора до температуры не выше 150 К позволяет минимизировать его темновой ток.

Охлаждение гиперспектрометра CRISM производится с помощью трех криокулеров Стирлинга типа RICOR K508. При этом первые два криокулера индивидуально охлаждают матричные сенсоры (при 213 К и меньше 120 К соответственно), а третий выполняет следующие задачи:

- поддержание температуры спектрометров на уровне или ниже 198 К, чтобы минимизировать тепловое ИК-излучение фона;
- поддержание температуры оптики около 213 К — для минимизации ее теплового ИК-излучения;
- поддержание температуры механических кулеров выше 233 К для обеспечения эффективности охлаждения и для предотвращения утечки хладагента.

ВЫВОДЫ

Последние разработки спутников наблюдения Земли и систем подспутниковой валидации (бортовых платформ авиационного базирования и наземных систем) продемонстрировали, что гиперспектральные системы и приборы являются ценным инструментом для количественной

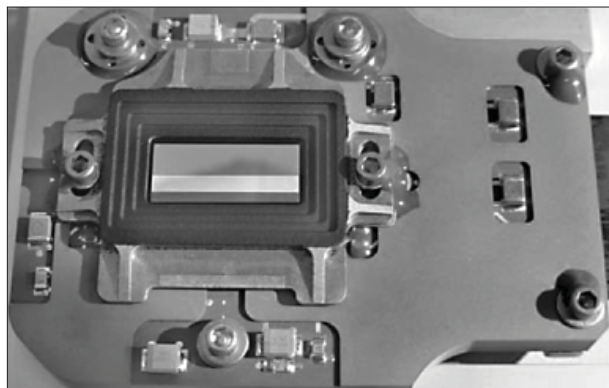


Рис. 5. Узел бортового спектрометра М3 с сенсором TSM6604A 640 × 480 пкл и трехзонным ИК-фильтром [49]



Рис. 6. Кремниевый матричный сенсор *VNIR*-диапазона с тепловой изоляцией и кабелями [30, 36]



Рис. 7. Матричный КРТ-сенсор ИК-диапазона с тепловой изоляцией [36]

оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

Немалую роль в работе каждой гиперспектральной системы играет правильно подобранное для конкретной задачи и оптической схемы фотоприемное устройство, содержащее матричный или линейный приемник излучения.

В данном обзоре рассмотрены как общий подход к проблеме, так и особенности использования приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах авиационного и космического базирования (AVIRIS первого и второго поколения, APEX, HYDICE, «Ресурс-П» и др.) для спектрометрического исследования земной поверхности, подспутниковой валидации спектрометрических данных, а также в компактных приборах типа M3 Spectrometer и CRISM для исследования поверхности Луны и Марса. Каждый из этих матричных фотоприемников обладает специфическими свойствами и особенностями его применения и эксплуатации.

Результаты обзора будут полезны исследователям и разработчикам оптико-электронных приборов, особенно гиперспектральной аппаратуры нового поколения.

Частично поддержана проектом УНТЦ № 5240.

1. Андрианов В. Ю. Англо-русский толковый словарь по геоинформатике [Электронный ресурс] // — Режим доступа: <http://www.dataplus.ru/Dict/show.asp?ID=1960>
2. Андронов А. «Новый спутник «Ресурс-П» не выведет Россию в лидеры» [Электронный ресурс] // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. — 24 мая 2004 г. — Режим доступа: <http://www.gisa.ru/38142.html>
3. Архипов С. А., Линько В. М., Бакланов А. И. Гиперспектральная аппаратура для КА «Ресурс-П» и перспективы ее модернизации // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социальном развитии общества», Самара, 28 сентября — 3 октября 2009 г. — Самара, 2009. — С. 186.
4. Архипов С. А., Линько В. М., Бакланов А. И. и др. Выбор схемного решения гиперспектральной съемочной оптико-электронной аппаратуры для КА «Ресурс-П» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Arxipov-linko.pdf
5. Архипов С. А., Линько В. М., Лукашевич Е. Л. Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП» // Шестая всерос. откр. ежегод. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 10—14 ноября 2008 г.: Сб. тез. конф. — М., 2008. — Режим доступа: <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=1476>
6. Архипов С. А., Линько В. М., Лукашевич Е. Л. Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Arxipov%20-%20Sokol.pdf
7. Белов А. А., Бер П., Воронцов Д. В. и др. Прототип распределенной бортовой вычислительной системы [Электронный ресурс]. — М., 2004. — (Препринт / РАН. Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша (по проекту № 2323)). — Режим доступа: http://www.keldysh.ru/papers/2004/prep25/prep2004_25.html
8. Богомолов Е. Н., Василец Н. В., Кривенков Б. Е. и др. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «СЕНСОР» // Автометрия. — 1989. — № 5. — С. 83—91. — Режим доступа: http://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1989/5/83-91.pdf
9. Виготовлення польового спектрофотометра для тестування стану рослинності [Електронний ресурс] // Науково-технічні (інноваційні) проекти НАН України. — Режим доступу: <http://www.nas.gov.ua/innovations/years/2008/802/Pages/default.aspx>
10. Вишневский Г. И., Коссов В. Г., Нестеров В. К. и др. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе. Часть I. [Электронный ресурс] // ТелеФото Техника: Интернет-журн. — 01.11.2008. — Режим доступа: <http://www.telephototech.ru>
11. Вишневский Г. И., Коссов В. Г., Нестеров В. К. и др. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе. Часть II. [Электронный ресурс] // ТелеФото Техника: Интернет-журн. — 04.06.2009. — Режим доступа: <http://www.telephototech.ru>
12. Воронай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г. Спектральные приборы на основе дисперсионного модуля с микрозеркальной матрицей [Электронный ресурс]. — Минск. — Режим доступа: http://www.oop-ros.org/maket/part1/refl_1/1.2.2.pdf
13. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р. и др. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. — 2010. — № 4. — С. 23—26. — Режимы доступа: http://geomatika.ru/pdf/2010_04/2010_04_004.pdf, http://geomatika.ru/pdf/2010_04/2010_04.pdf
14. Донец В. В. Обгрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2010. — 19 с.
15. Кондратин Т. В., Козодеров В. В., Топчиев А. Г. и др. Технология оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным аэрокосмического мониторинга [Электронный ресурс]. — М.: МФТИ, МГУ, Институт выч. математики РАН, НПО «Леп-

- тон», 2007. — Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2007_pdf/rasten/kondratin.pdf
16. Кулев М. О., Барышников Е. В., Павлов А. Н. и др. Оценка влияния неоднородности чувствительности ячеек ПЗС на погрешность датчика координат очага возгорания [Электронный ресурс] // Ползуновский Вестник. — 2007. — № 3. — С. 56 — 58. — Режим доступа: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2007_03/pdf/056%20kule.pdf
 17. Лапчук В. П., Ивченко В. Н. Статический фурье-спектрометр видимого диапазона для микроспутников [Электронный ресурс] // Вторая всерос. откр. ежегод. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тез. конф. — М.: ИКИ РАН, 2004. — Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/earth/tes.pdf>
 18. Новый российский спутник дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» будет работать на орбите не менее пяти лет [Электронный ресурс] // Новости космонавтики: Архив новостей. — 2009. — Вып. 790. — Режим доступа: <http://www.novostikosmonavтики.ru/content/news.shtml>
 19. Овчинников А. М., Платонов А. К. Гиперспектральная система зрения для мобильных роботов [Электронный ресурс] // Photogr. Eng. and Remote Sens. — 1997. — 63, N 7. — Режим доступа: <http://tz2010.cosmos.ru/ppt/platonov.ppt>
 20. Орлов А. Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИКИ РАН, 2008. — 26 с. — Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/rus/orl.pdf>
 21. Попов М. А., Станкевич С. А., Ковальчук С. П. и др. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс] // 8-ма Міжнар. наук.-практична конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», Київ — Харків — АР Крим, 7—11 вересня 2009 р.: Зб. наук. праць. — Режим доступа: http://www.itel.nas.gov.ua/activity/nauk_trud_8_2009_web.pdf
 22. Стемпковский А., Шилин В. КМОП — фотодиодные СБИС. Перспективная элементная база однокристальных систем приема и обработки информации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.electronics.ru/issue/2003/2/3/>
 23. Чем матрица CCD отличается от матрицы CMOS? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sprucams.ru/ccd-cmos.html>
 24. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
 25. Aikoi Mauri. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [Электронный ресурс]. — Finland ES-POO 2001. — Режим доступа <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P435.pdf>
 26. AIS4 Dual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.channelsystems.ca/documents/AISADualver1-07.pdf>
 27. Aksakal S. KOCAMAN sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery DISS. N 18120 [Электронный ресурс]. — Turkey, Middle East Technical University, 2008. — Режим доступа: www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/106.pdf
 28. ARTEMIS (Advanced Responsive Tactically Effective Military Imaging Spectrometer) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://events.eoportal.org/presentations/9911/14941.html#footback12%29>
 29. AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) — eoPortal [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.eoportal.org/directory/pres_AVIRISAirborneVisibleInfraredImagingSpectrometer.html
 30. Bai Yibin, Bajaj J., Beletic J. W., et al. Teledyne imaging sensors: Silicon CMOS imaging technologies for x-ray, UV, visible and near infrared [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rockwellscientific.com/infrared_visible_fps/Teledyne%20Imaging%20Sensors%20-%20Visible%20SPIE%20Paper%20_7021-01_.pdf
 31. Bannari A., Chevrier M., Staenz K., McNairn H. Potential of hyperspectral indices for estimating crop residue cover [Электронный ресурс] // Rev. Télédétection. — 2007. — 7, N 1-2-3-4. — P. 447—463. — Режим доступа: <http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20080527120832.pdf>
 32. Bianco A. D., Serafino G., Spock G. An introduction to spectral imaging [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://english.ctr.at/carinthian_tech_research_english/dokumente/Daten_u_Produktblaetter/optSysteme/IntSpImg_web.pdf
 33. Bridges N. T. et al. Simulating CRISM and HIRES data using airborne hyperspectral imagery [Электронный ресурс] // Lessons learned from ground truth / 41st Lunar and Planetary Science Conference. — 2010. — Режим доступа: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/1887.pdf>
 34. CASI-2 sensor, Overview of Configuration & Specification [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arsf.nerc.ac.uk/documents/casi2.pdf>
 35. CHAPTER 1 The Nature of Remote Sensing (Remote Sensing Models and Methods for Imaging Processing by Robert Schowengerdt..., [Электронный ресурс] — 2007. USA. — Режим доступа: <http://v5.books.elsevier.com/bookscat/samples/9780123694072/9780123694072.pdf>
 36. CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php>

37. *Cristina Antonella Maria, Nathues Andreas, Eng Pascal, et al. VIS-IR imaging spectrometer for MARCO POLO* [Электронный ресурс] // 18–20 May 2009. — Marco Polo Symposium — Режим доступа: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?fobjectid=45193>
38. *Cocks T., Janssen R., Stewart A., et al. The HyMAP™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance* [Электронный ресурс] // Presented at 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, — October 1998. — Zurich. — Режим доступа: http://www.aigllc.com/pdf/EARSEL98_HyMap.pdf
39. *Cutter M. A. Compact high resolution imaging spectrometer (CHRIS)* [Электронный ресурс] // — Режим доступа: <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-061/MP-061-24.pdf>
40. *EnMAP hyperspectral imager (HSI)* [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.enmap.org/sensors>
41. *Folientitel Kein EnMAP* — Режим доступа: http://earth.esa.int/workshops/4th_chris_proba/CHRIS_WS4_KAUFMANN.pdf
42. *FPGA-based CMOS Matrix Controller for Digital Camera* [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.promwad.com/markets/digital-camera-cmos-fpga.html>
43. *Gat N. Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review* [Электронный ресурс] // Proc. SPIE. — 2000. — **4056**. — P. 50–64. — Режим доступа: <http://www.techexpo.com/WWW/opto-knowledge/E-tunable-filters.pdf>
44. *Green R., et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIRIS* // Remote Sens. Environ. — 1998. — **65**. — P. 227–248. — Режим доступа: <http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ES6973/AVIRIS.pdf>
45. *Green R. O., et al. HypsIRI Decadal Survey Mission Development Status* [Электронный ресурс] // Decadal Survey Symposium. — 2009. — Режим доступа: http://decadal.gsfc.nasa.gov/documents/12_HypsIRI.pdf
46. *Hamlin L., Green R. O., Mouroulis P., et al. Imaging Spectrometer Science Measurements for Terrestrial Ecology: AVIRIS and the Next Generation AVIRIS Characteristics and Development Status* [Электронный ресурс] // Jet Propulsion Laboratory, California Ins@tute of Technology Pasadena, CA, 91109 22 June 2010. — NASA Earth Science Technology Forum. — Режим доступа: http://esto.nasa.gov/conferences/estf2010/presentations/Hamlin_Green_ESTF2010_B4P4.pdf
47. *HyMap DAIS Airborne Hyperspectral Scanner* [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.op.dlr.de/dais/hymap/hymap_info.htm
48. *Indium Antimonide Detectors* [Электронный ресурс] — Teledyne Judson Technologies — 2003. — LLC. — USA. — Режим доступа: <http://www.teledynejudson.com/indiumant.html>
49. *Infrared Focal Plane Arrays* [Электронный ресурс] // Opt. and Photonics News. — June 2008. — **19**, N 6. — Режим доступа: http://www.ee.ucla.edu/~leosla/documents/James_Beletic_OPN.pdf
50. *Ires Research of Canada* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.itres.com/products/imagers/casi1500>
51. *Kempeneers P. Information Extraction from Hyperspectral Images* [Электронный ресурс] // Antwerpen. — 2007. — Режим доступа: <http://www.vliz.be/imisdocs/publications/121922.pdf>
52. *Kaufmann H., Segl K., Chabrilat S., et al. ENMAP — An advanced optical payload for Earth observation* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/getmedia/0382afb3-531e-42dc-9cca-368224d86478/EnMAP—An-Advanced-Optical-Payload-for-Earth-Observation.pdf.aspx>
53. *Kaufmann H., Segl K., Chabrilat S., et al. ENMAP — An advanced hyperspectral mission* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.earsel.org/workshops/IS_Warsaw_2005/papers/Sensors_Missions/03_Kaufmann_31_34.pdf
54. *Kodak Digital Science KAC — 1310* [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://lir.bagn.obs-mip.fr/observing/docu/KAC1310_datasheet.pdf
55. *LUPA-1300-C-1. 3 M pixel high speed CMOS image sensor* [Электронный ресурс] — Cypress Semiconductor. — Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/129200/CYPRESS/LUPA-1300-C.html>
56. *LUPA-4000: 4M Pixel CMOS image sensor* [Электронный ресурс] — Cypress Semiconductor. — Режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/106605/CYPRESS/LUPA-4000.html>
57. *Mouroulis P., Sellar R. G., Wilson D. W., et al. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy* [Электронный ресурс] // Opt. Eng. — 2007. — **46**, N 6. — Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40926/1/06-1912.pdf>
58. *Müller A. The new frontiers of hyperspectral imaging sensors* [Электронный ресурс] // — Режим доступа: http://hyperinet.multimediacampus.it/images/Mueller_1.pdf
59. *Murchie S., Arvidson R., Bedini P. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO)* [Электронный ресурс] // J. Geophys. Res. — 2007. — **112**. — Режим доступа: <http://www.planetary.brown.edu/pdfs/3554.pdf>
60. *Neural network architectures for information extraction from hyper...* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.disp.uniroma2.it/geoinformation/students/geoinformation-dissertations/hyper-spectral-images.pdf>
61. *Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRISng)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://airbornescience.jpl.nasa.gov/avirisng/>

62. Nieke Jens, Kaiser J. W., Schlöpfer D., et al. Calibration methodology for the Airborne Dispersive Pushbroom Imaging Spectrometer (APEX) [Электронный ресурс] // Proc. SPIE. — 2004. — **5570**. — Режим доступа: http://earth.esa.int/workshops/ivos05/pres/09_nieke.pdf
63. Nischan M. L., Kerekes J. P., Baum J. E., et al. Analysis of HYDICE noise characteristics and their impact on sub-pixel object detection // Proc. SPIE. — 1999. — **3753**. — P. 112–123. — Режим доступа: <https://ritdml.rit.edu/bitstream/handle/1850/3210/JKerekesConfProc07-19-1999.pdf>
64. Ocean Optics, LVF-series Linear Variable Filters [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.oceanoptics.com/products/lvflinearvariablefilters.asp>
65. Parameters of selectable CCD area array [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://space.univ.kiev.ua/~lapchuk/ccdarea1.htm>
66. Pearlman J. S., Barry P. S., Segal C. C., et al. Hyperion, a space-based imaging spectrometer [Электронный ресурс] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2003. — **41**. — P. 1160–1173.
67. Richardson B. S., Eastwood M. L., Bruce C. F., et al. Mercury-cadmium-telluride focal plane array performance under non-standard operating conditions [Электронный ресурс] // Aerospace Conf. — March 2011. — P. 1–6. — Режим доступа: http://journals2.scholarsportal.info/details.xqy?uri=/1095323x/v2011inone/1_mfrapunoc.xml
68. Roden N. C., et al. Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy [Электронный ресурс] // IG-ARSS, August 1, 2006. — Режим доступа: http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/9_Clark_Mineral/Clark_Mineral.pdf
69. Schaepman M., Alberti E., Dell'Endice F., D'Odorico P. APEX Airborne Prism Experiment [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://hyspirci.jpl.nasa.gov/downloads/2009_Workshop/day3/day3_5_20090813_APEX_HyspIRI_Schaepman.pdf
70. Schlöpfer D., Kaiser J. W., Nieke J., et al. Modeling and correcting spatial non-uniformity of the APEX pushbroom imaging spectrometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rsl1/Spec2004/AVWS2004_apex_ds.pdf
71. SPECIM ImSpectors [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.specim.fi/media/pdf/imspector-datasheets/vis-vnir-imspectors-ver1-2009.pdf>
72. Semeniv O., Yatsenko V., Khandriga P., Shatokhina Yu. A hyperspectrometer for remote sensing of biochemical components in the vegetation [Электронный ресурс] // 37th COSPAR Scientific Assembly. 13–20 July 2008, in Montréal, Canada. — P. 2806. — Режим доступа: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37.2806S>
73. Tong Q. Hyperspectral remote sensing technology and applications in China [Электронный ресурс] / Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen // Proc. of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy 28–30 April 2004. — Режим доступа: http://earth.esa.int/workshops/chris_proba_04/papers/39_tong.pdf
74. The Airborne Imaging Spectrometer ROSIS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.opairs.aero/media/download/pdf/rosis-description.pdf>
75. The AHS2005 Flight Campaign APEX [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://campaigns.vgt.vito.be/documents/IR-AHS2005.pdf>
76. The DAIS 7915 System Specifications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.op.dlr.de/dais/dais-scr.htm>
77. Turner W. Status of HyspIRI Mission [Электронный ресурс] // HyspIRI Sci. Symp., 2011, May 17–18. — Режим доступа: http://hyspirci.jpl.nasa.gov/downloads/2011_Symposium/Summary_2011_HyspIRI_Symposium_2.pdf
78. Weatherup Cliff CCD and CMOS imaging Where are we? [Электронный ресурс] — 12th May 2010. — Режим доступа: <http://www.qi3.co.uk/wp-content/uploads/2010/05/Cliff-Weatherup-Web-version.pdf>
79. Wilson I. J., Cocks T. D. Development of the airborne reflective emissive spectrometer (ARES) A Progress Report [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.earsel.org/workshops/imaging-spectroscopy-2003/papers/sensors_and_missions/wilson.pdf

Надійшла до редакції 12.09.11

V. V. Donets, L. I. Muravskiy

SOME FEATURES OF THE USE OF EMISSION DETECTORS IN ON-BOARD HYPERSPECTROMETERS

We consider some features of the application of linear and matrix emission detectors in on-board air- and space-based hyperspectrometers (AVIRIS of the first and second generations, APEX, HYDICE, RESURS-P and others) for the spectrometric study of the Earth's surface, for spectrometric data subsatellite validation and also in compact devices for the exploration of the Moon's and Mars' surfaces (M3, CRISM).

УДК 621.396.1

С. В. Ковбасюк, Л. Б. Каневський

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету

МЕТОД ОБРОБКИ ТРАЄКТОРНИХ ДАНИХ ДЛЯ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У БАГАТОПОЗИЦІЙНОМУ ОПТИЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

Запропоновано метод застосування оптичних засобів контролю космічного простору для оперативного визначення параметрів руху космічних об'єктів з підвищеною точністю в інтересах національного користувача балістико-навігаційних даних. Основна увага приділена математичному забезпеченню спільної обробки траєкторних даних при створенні багатопозиційного оптичного комплексу.

ВСТУП

Сучасна космічна діяльність високорозвинутих держав спрямована на економічний та науково-технічний розвиток, розв'язання глобальних проблем людства, у тому числі проблем безпеки [2]. Такі тенденції сприяють активному пошуку Україною свого місця на космічному ринку, формуванню космічної політики, орієнтованої на задоволення нагальних загальнодержавних потреб.

Будучи космічною державою, Україна активно бере участь у різних космічних програмах, виводячи за допомогою своїх ракет-носіїв на навколоземну орбіту космічні апарати (КА). Важливими питаннями з точки зору розвитку зовнішньоекономічної діяльності, за якими попередньо проводиться тендер щодо надання таких послуг, є:

- об'єктивний контроль процесу виведення КА ракетою-носієм з такою класифікацією: штатний, нештатний, аварійний режим;
- надання послуг із забезпечення управління КА завдяки своєчасній видачі достовірних цілевказівок засобам управління польотом КА.

Для реалізації цих завдань необхідно мати оперативну і достовірну інформацію про навколоземну ситуацію, що потребує ведення націо-

нального каталогу космічних об'єктів (КО). Тому перед балістиками постає актуальне на сьогодні завдання контролю космічного простору (ККП) для безпечного виведення КО, що у свою чергу потребує своєчасних та достовірних даних про кількість і параметри руху як щойно запускених КО, так і об'єктів, що вже перебувають в навколоземному просторі.

Необхідність ведення національного каталогу КО зумовлена також вимогою:

- високоточного балістико-навігаційного забезпечення планування застосування вітчизняних космічних апаратів з високою роздільною здатністю (у перспективі – угруповань КА);
- контролю наявності в навколоземному космічному просторі великої кількості малорозмірних об'єктів, що становлять загрозу рухові діючих КА.

Результати аналізу циклоїд запуску і виведення на робочу орбіту КА показують, що в цих процесах використовують 6–8 наземних та надводних командно-вимірювальних комплексів з метою максимальної щільності засобів приймання телеметричної інформації та вимірювання параметрів руху на перших витках польоту. За інформацією агентства Xinhua відомо, що при виведенні супутника китайської орбітальної навігаційної системи «Бейдоу-2», який успішно запускений 27 липня 2011 р. з космодрому Сичан (південно-західна провінція Сичуань), додатково до націо-

ональних були задіяні принаймні два іноземні засоби ККП [http://news.xinhuanet.com/2011].

Однак при виникненні аварійної ситуації оперативність пошуку КА без використання засобів активної радіолокації, оптичних засобів у режимі попереднього прогнозування можливої обстановки значно знижується. Останній приклад — автоматична міжпланетна станція «Фобос-Грунт», коли після аварійного запуску першими на другу добу польоту офіційну інформацію про параметри руху станції надали США за результатами роботи системи ККП.

Система ККП США має змогу вести спостереження протягом більш як 50 % витка польоту КО, що дає можливість за 1–1.5 доби отримати повну інформацію про об'єкт спостереження. Сучасну та територіально розподілену систему контролю космосу має Російська Федерація, активно створює таку систему Китайська Народна Республіка, Франція використовує бістатичний радіолокатор метрового діапазону, а Німеччина отримує портрети КО у навколосезонному просторі з використанням системи з двох радіотелескопів у Еффельберзі, характеристики якого близькі до євпаторійського РТ-70, та Вахтаберзі.

Україна також має на своїй території засоби активної радіолокації, які мають можливість безперервно вести спостереження за космічним простором, оптичні засоби, а також унікальний радіотелескоп РТ-70.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Виконання завдань з ККП в Україні покладено на Систему контролю та аналізу космічної обстановки (СКАКО) Державного космічного агентства України (ДКАУ). Існують певні проблеми організації роботи СКАКО з ведення та оновлення каталогу КО.

1. Інформаційні джерела не функціонують у єдиному задумі та під єдиним керівництвом на вирішення завдань ККП.

2. Радіолокаційні станції 5Н86-М «Дніпро» [1] на даний час не використовуються в інтересах ККП, оскільки вони технічно застарілі, модернізація їх відкладена на невизначений термін.

3. Згідно з документами, що планують космічну діяльність держави на термін до п'яти років,

модернізація радіотелескопу РТ-70, який має високі технічні характеристики і потенційно може використовуватись при рішенні задач ККП, не планується.

4. Контрольно-вимірювальні комплекси працюють тільки за КА, якими здійснюють управління.

Таким чином, єдиним на даний час засобом отримання інформації про параметри руху КО в інтересах ККП є оптичні та оптико-електронні засоби. Оптичні засоби ДКАУ, а також обсерваторії Одеси, Херсона, Ужгорода вже використовуються для вирішення задач СКАКО по пріоритетних КО в рамках договорів про науково-технічне співробітництво, ряд інших оптичних засобів додатково може залучатися до вирішення визначених завдань у рамках добових та погодних обмежень на їхнє використання.

Застосування таких засобів для ККП в умовах відсутності вітчизняного каталогу КО має ряд обмежень та особливостей:

- проведення вимірювань не трьох (як в активних радіолокаторах), а лише двох просторових координат;
- імовірний пропуск сеансу супроводження в умовах апріорної невизначеності параметрів руху КО;
- необхідність зав'язування нової траєкторії при супроводженні КО, що потребує накопичення масивів вимірювань за декілька прольотів КО та знижує оперативність отримання вихідної інформації;
- наявність методичних похибок та обчислювальна складність числових методів розв'язку багатоточкових крайових задач, що використовуються для визначення параметрів руху КО.

Незалежно від цього оптичні засоби мають високі точнісні параметри вимірювань кутових координат та перекривають усі висоти польоту КО [4]. Добові та погодні умови не залежать від спостерігача, однак інші недоліки та обмеження в роботі оптичних засобів можуть бути зменшені та враховані шляхом розробки відповідного програмно-алгоритмічного забезпечення.

Для пасивних систем виявлення, а саме такими і є оптичні засоби спостереження (ОЗС), в умовах апріорної невизначеності пошук необ-

хідного КО є складною задачею. Один з варіантів її розв'язання розроблено у роботі [8], де запропоновано метод послідовного аналізу з відсівним експериментом, який за допомогою методу поблокової обробки вимірювань зводиться до послідовної перевірки багатоальтернативних гіпотез з попередньою ієрархічною селекцією. На основі аналізу задач обробки локаційних даних при синтезі вирішального правила перевірки багатоальтернативних гіпотез знаходиться найкраще розбиття простору спостережень, що дає змогу вирішити проблему пошуку необхідного КО в умовах невизначеності.

Складність ведення каталогу КО полягає в тому, щоб у стислі терміни отримати точні балістико-навігаційні дані. Найбільш оптимальним рішенням цієї проблеми є об'єднання даних з усіх інформаційно-вимірювальних засобів у єдину систему та організація їхньої роботи у два етапи. На першому етапі за результатами функціонування радіолокаційних засобів безперервного спостереження за КА проводиться первинна, груба оцінка параметрів орбіти об'єктів спостереження. На підставі цієї інформації формуються цілевказівки високоточним засобам (наприклад, квантово-оптичній системі «Сажень-С») для локації екстрапольованої просторової області знаходження КО. За результатами роботи цих засобів (чи спільної обробки інформації грубих і точних засобів) на другому етапі відбувається точне визначення параметрів орбіт КО з використанням мінімальної кількості мірних витків і подальше оновлення даних каталогу.

Слід зазначити, що у штатному режимі наявних на території України радіолокаційних станцій інформація може видаватися про КО, що пролітають на висоті до 1500 км, проте модернізація алгоритмів роботи та апаратурної частини потенціалу радіолокаційних систем дозволить контролювати високі орбіти КА. У цих умовах можлива видача цілевказівок і підключення до рішення завдань ККП радіотелескопа РТ-70, який дозволить проводити високоточні вимірювання не лише трьох просторових координат, але, враховуючи можливість роботи на різних частотах, за наявності двох локаторів з різними

характеристиками, отримувати радіолокаційні портрети об'єктів локації.

Перша проблема для реалізації двоетапної процедури в Україні: наявні радіолокаційні станції не працюють у штатному режимі, тобто початкової інформації від національних вимірювальних засобів спостереження немає. Вихід з положення — використання інших джерел інформації, а саме: відкритих офіційних каталогів (наприклад NORAD) і приватних спостерігачів, а також аналітичні розрахунки [8], що дозволять формувати завдання на пошук об'єктів у певних просторових секторах, виходячи з призначення КА, а при нових запусках — з урахуванням апріорної інформації (кутів запуску з конкретного космодрому, типу ракетоносія тощо). Недоліком такого підходу є неможливість використання вихідних даних в алгоритмах обробки вимірювань в якості початкових параметрів руху у зв'язку з грубим характером аналітичних розрахунків та відсутністю інформації про моделі руху КО, атмосфери, методи обробки координат та значення констант, використаних для отримання даних NORAD. В результаті використання таких даних можна отримати розходження алгоритмів уточнення параметрів руху КО. У зв'язку з цим за результатами роботи ОЗС за зовнішніми цілевказівками або методом пошуку необхідно зав'язувати нову траєкторію, для чого при традиційному підході потрібно як мінімум два мірні витки. Це значно знижує оперативність отримання інформації з урахуванням обмежень на роботу і просторову дислокацію вітчизняних ОЗС.

Метою статті є розробка високоточного оперативного (у межах одного витка польоту) методу обробки траєкторних даних в оптичних засобах ККП.

ПОБУДОВА МЕТОДУ ОБРОБКИ ТРАЄКТОРНИХ ДАНИХ

Для розв'язку задачі оперативного (в межах одного витка) методу визначення параметрів руху КА в автономному оптичному засобі авторами був розроблений двоетапний метод [3], який здійснює вагове згладжування одночасно в просторі всіх вимірювань і видає оцінку вектора па-

параметрів руху КА в геоцентричній абсолютній системі координат (ГАСК):

$$\mathbf{X}_{\text{пу}} = (x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1), \quad (1)$$

де x_0, y_0, z_0 — координати КА, x_1, y_1, z_1 — швидкості зміни відповідних координат.

Для отримання оцінки параметрів руху КА з максимально можливими точнісними характеристиками у методі траєкторної обробки оптичних вимірів необхідно використовувати динамічну модель руху об'єкта та обробляти вимірювання на усьому часовому інтервалі перебування КА в зоні дії вимірювального засобу. Як метод безумовної оптимізації для статистичної обробки зашумлених вимірів слід використовувати метод найменших квадратів, а для оперативності розрахунків — метод Гаусса — Ньютона.

Підсумкова оперативність роботи (обчислювальна складність) методу траєкторної обробки буде визначатися: вибраним методом розрахунку часткових похідних від вимірюваних функцій за початковими умовами руху КА, що може потребувати до 80 % часових і обчислювальних ресурсів, а також від вибору методу проведення інтегрування відповідних диференціальних рівнянь руху об'єкта [9].

Для усунення суперечності між точністю і оперативністю при використанні в методах траєкторної обробки традиційних кінечно-різницевої схем, що виражається в їхній великій обчислювальній складності і неможливості отримання аналітичного вирішення завдань, — запропоновано використовувати метод диференціальних перетворень, який ґрунтується на переведенні оригіналів в область зображень за допомогою операції диференціювання [6, 7]. Метод дозволяє, при спрощенні процедури проведення математичного моделювання фізичних процесів (об'єктів), які описуються нелінійними інтегродиференціальними рівняннями, отримувати для них в області зображень точні диференціальні моделі завдань і при цьому зберігає потенційну можливість отримання точного рішення (відновлення) в області оригіналів.

Диференціальні перетворення можуть бути різної мірності, що залежить від самої задачі. У розглядуваному випадку застосовуються багато-

вимірні диференціальні перетворення:

$$Z(K_1, \dots, K_L) = P_L \{z(W)\}_{W^*} = \frac{\prod_{l=1}^L H_l^{K_l}}{\prod_{l=1}^L K_l!} \left[\frac{\partial^{\sum_{l=1}^L K_l} z(W)}{\prod_{l=1}^L \partial w_l^{K_l}} \right]_W, \quad (2)$$

$$z(W) = P_L^{-1} \{Z(K_1, \dots, K_L)\}_{T_N} = f(W, C), \quad (3)$$

де W — аргумент (вектор), за яким проводиться перетворення, розміром L , W^* — значення аргументу, за яким проводиться перетворення, $Z(K_1, \dots, K_L)$ — дискретна функція цілочислових аргументів $K_l = 0, 1, 2, \dots$, H_l — відрізок аргументу, на якому розглядається функція $z(W)$, $f(W, C)$ — функція відновлення, або апроксимуюча функція, C — вектор довільних коефіцієнтів.

Пряме перетворення (2) переводить вихідну модель з області оригіналів в область зображень, яка є системою рекурентних рівнянь відносно диференціального спектру моделі. З неї послідовно можна визначити значення дискрет диференціального спектру, задаючи величину цілочислового аргументу, починаючи з $K = 0$. Тоді операцію відновлення оригіналу (3) на великих інтервалах аргументу слід проводити в схемі диференціально-тейлорівських перетворень.

Для отримання початкових наближень, необхідних для роботи метода Гаусса — Ньютона, запропоновано алгоритм, що ґрунтується на методі балансу спектрів із застосуванням математичного апарату диференціальних перетворень [6, 7] та є першим етапом запропонованого методу траєкторної обробки.

З метою підвищення точнісних характеристик визначення параметрів руху КО за результатами супроводу на одному витку польоту пропонується використати великобазовий багатопозиційний оптичний комплекс (БпОК), побудований на основі наявних засобів, де база між вимірювальними засобами буде сумірною з висотою польоту КО.

Концепція такого комплексу для автономних радіолокаційних станцій і його переваги розглянуті в роботі [1]. Основна ідея БпОК полягає в

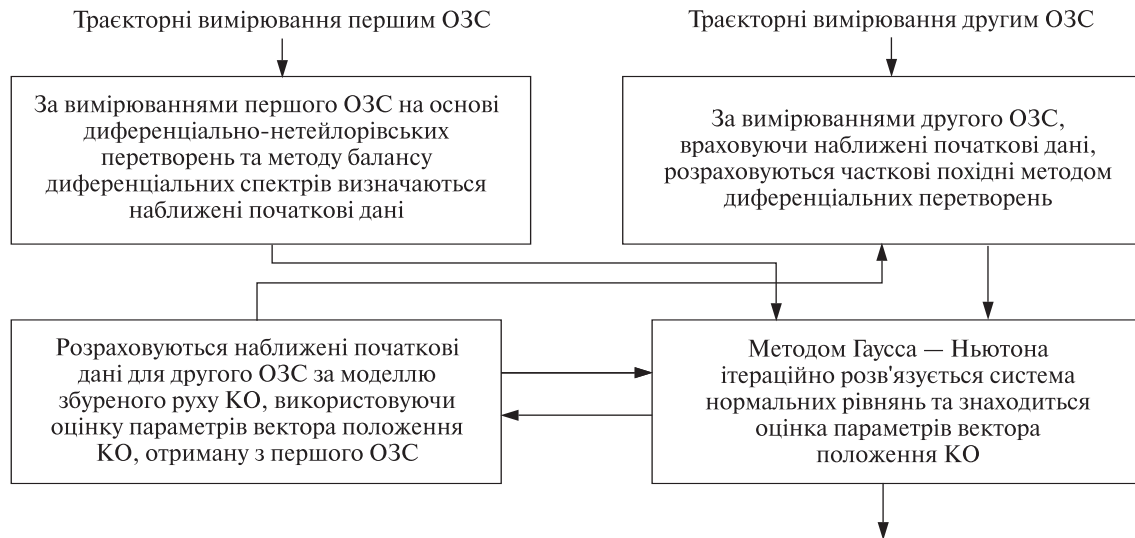


Рис. 1. Структурна схема алгоритму оцінювання параметрів руху динамічної системи у двопозиційному оптичному комплексі

тому, щоб ефективно використати надлишкову інформацію, отриману з суттєво рознесених просторових напрямків спостереження за КА, що дає можливість значно підвищити точність оцінювання параметрів руху об'єктів (див. роботу [5]).

Особливості застосування аналогічного підходу до оптичних засобів такі:

- вимірювання двох просторових координат, що впливає на вибір методу обробки вимірювань (необхідність застосування додатково попереднього етапу визначення початкових наближень) та точнісні характеристики оцінки параметрів руху;

- обмеження ефективного використання БпОК за висотами польоту КА: територіальні розміри України дозволяють це лише для низькоорбітальних об'єктів (розгляд питання про використання БпОК для високоорбітальних і геостационарних КО виходить за рамки роботи).

Як приклад БпОК розглянемо випадок двопозиційної оптичної системи. Припустимо, що зони огляду ОЗС мають спільну зону спостереження, максимальне значення якої становить близько 30 % від розміру зони спостереження одним ОЗС. Відстань між вимірювальними засобами сумірна з дальністю до об'єкта спостереження.

З поставленого завдання випливає, що роботу системи з двох оптичних засобів потрібно організовувати в два етапи. На першому етапі за результатами функціонування першого ОЗС слід розрахувати наближені початкові дані для другого ОЗС за моделлю збуреного руху КО, використовуючи оцінку параметрів вектора його положення. Наступним етапом за результатами роботи другого ОЗС необхідно провести точне визначення параметрів руху КО.

Розглядаючи КО в навіколоземному просторі як рух динамічної системи, у першу чергу необхідно враховувати, що це є збурений рух, диференціальне рівняння якого в абсолютній прямокутній системі координат має вигляд

$$\begin{aligned}\ddot{X} &= -\mu_3 \frac{X - X_0}{r^3} + \frac{F'_x}{m_{\text{КО}}}, \\ \ddot{Y} &= -\mu_3 \frac{Y - Y_0}{r^3} + \frac{F'_y}{m_{\text{КО}}}, \\ \ddot{Z} &= -\mu_3 \frac{Z - Z_0}{r^3} + \frac{F'_z}{m_{\text{КО}}},\end{aligned}\quad (4)$$

де X_0, Y_0, Z_0 — координати центра тяжіння основного об'єкта, що притягується, $\mu_3 = 3.986 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — гравітаційна стала Землі, F'_x, F'_y, F'_z — компоненти збурювальних сил за відповідними осями, $m_{\text{КО}}$ — маса КО.

Створення БпОК для оперативного визначення параметрів руху КО (1) з підвищеною точністю на прикладі двопозиційного оптичного комплексу із заданими умовами у випадку рівнозначності дискрет диференціальних спектрів у цих ОЗС пропонується проводити за алгоритмом оцінки стану динамічної системи, що схематично зображений на рис. 1.

Оскільки процес руху КО описується системою складних нелінійних векторних рівнянь, необхідно розраховувати їхні імовірнісні характеристики поряд з оцінкою вектора параметрів руху об'єкта. Вичерпною імовірнісною характеристикою в рамках кореляційної теорії є кореляційна матриця похибок оцінювання, яка характеризує похибки за відповідними координатами та орієнтацію еліпсоїда похибок у просторі.

Нехай m -вимірний вектор d_i є різницею між вектором розрахованих значень параметрів руху КО, визначених за наближеними даними методом БДС, та дійсними значеннями параметрів руху КО для деякого значення t_i , а послідовність вимірювань $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)$, де N — кількість вимірювань, тоді H можна описати співвідношенням

$$H_i = B_i d_k + v_i. \quad (5)$$

Матриця B_i прямо пропорційно показує залежність між перехідною матрицею стану та матрицею частинних похідних вимірюваних функцій за шуканими параметрами моделі:

$$B_i = G(t_i, t_k) \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X_i} \right)_{X_i = \hat{X}}.$$

Величина v_i у виразі (5) розподілена у вигляді $N(0, K)$, при цьому K є діагональною кореляційною матрицею похибок вимірювання кутових координат.

Таким чином, оцінка вектора d_k і матриці K буде визначатися формулами

$$\hat{d}_k = \left(\sum_{i=1}^N B_i^T K^{-1} B_i + (G(t_k, t_0) M [d_0 d_0^T] G(t_k, t_0)^T)^{-1} \right)^{-1} \times \sum_{i=1}^N B_i^T K^{-1} H_i,$$

$$\hat{X}_{\text{пу}} = (x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1),$$

$$\hat{K} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - B_i \hat{d}_k)(H_i - B_i \hat{d}_k)^T.$$

Шукані величини є нелінійно залежними, тому потрібно використовувати формули ітераційно для кожної номінальної траєкторії. Лише після того як буде оброблена вся сукупність вимірювань, можна отримати уточнені елементи виразу (1), піддавши отриману сукупність даних обробці методом Гаусса — Ньютона.

Для проведення імітаційного моделювання процесу траєкторної обробки запропонованим методом ітеративного оцінювання вектора стану $X_{\text{пу}}$ та кореляційної матриці похибок оцінювання K необхідно знайти розв'язок векторного диференціального рівняння збуреного руху КО (4) в ГАСК:

$$\dot{X} = \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

де $X = (x_i)^T$ — вектор параметрів руху КО ($i = 1, \dots, 6$).

З урахуванням розв'язку рівняння (6) та ряду збурювальних факторів систему диференціальних рівнянь (4) в ГАСК для проведення короткострокового прогнозу руху КО запишемо у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + w_3^2 x + 2w_3 v_y, \\ \dot{v}_y &= \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} + w_3^2 y - 2w_3 v_x, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{v}_z = \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial z},$$

$$x = v_x, \quad y = v_y, \quad z = v_z,$$

де $U_{\text{п}}$ — функція, що характеризує гравітаційний потенціал Землі, $w_3 = 0.72992 \cdot 10^{-4}$ рад/с — кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі.

Оскільки система є нелінійною системою диференціальних рівнянь, для її розв'язання застосовується апарат диференціальних перетворень. Вираз (2) дозволяє перевести систему в область зображень, де для оперування дискретами диференціального спектру застосовуються тільки алгебраїчні операції. Для переведення розв'язку в область оригіналу доцільно застосувати найпростіший вид (3), а саме диференціально-тей-

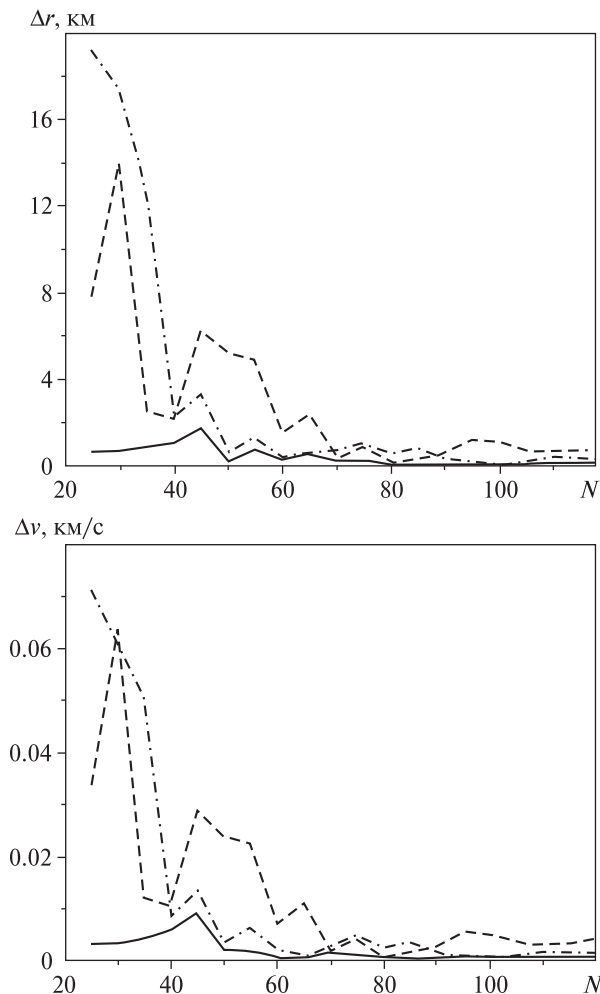


Рис. 2. Похибки визначення місцеположення та швидкості КА: штрихова крива — для першої станції, штрих-пунктирна — для другої станції, суцільна крива — для обох станцій

лорівські перетворення [6, 7]:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} X(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$y(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} Y(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$z(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} Z(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_x(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_x(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_y(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_y(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_z(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_z(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

де $X(k), Y(k), Z(k), V_x(k), V_y(k), V_z(k)$ — дискрети відповідних диференціальних спектрів, t_w — інтервал часу на часовій сітці від початку до кінця спостереження, k — номер дискрет $k = 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$.

Застосування диференціальних перетворень (2), (3) дає низку переваг:

- результат розрахунку є не сітковою, а кусково визначеною на відрізках між вузлами функцією, що дозволяє проводити прогноз, не прив'язуючись до застосування процедури інтерполяції;

- значно спрощується створення обчислювальних систем з адаптивним кроком за рахунок відсутності строгої необхідності розрахунку на рівномірній часовій сітці.

Для імітаційного моделювання були взяті початкові параметри руху реально діючого КО «Міжнародна космічна станція» станом на 26.08.2011 [<http://spaceflight.nasa.gov>]. У результаті моделювання з використанням програмного пакета Maple було отримано сукупність даних, що містила в собі 100 векторів вимірювань, кожен з яких складається з одиничних дискретних значень азимута ε і кута місця β . Похибки вимірювання кутових координат оптичних засобів ККП становили $\sigma_\varepsilon = \sigma_\beta = 1'' (0.48 \cdot 10^{-5} \text{ рад})$.

Дослідження проводились у діапазоні одного мірного витка, результат комп'ютерного моделювання, наведений на рис. 2, визначений часом спостереження як кожним ОЗС окремо, так і при їхній спільній роботі. Відповідно до уточнених значень вектора початкових параметрів руху (1) криві, показані на рис. 2, характеризують похибку положення та швидкості у ГАСК.

ВИСНОВКИ

Для вирішення проблеми оперативного отримання точних балістико-навігаційних даних про КО в умовах неможливості комплексного застосування різнотипних вимірювальних засобів за-

пропоновано обробку вимірювань кутових параметрів об'єктів спостереження, отриманих ОЗС у складі великобазового комплексу, проводити з використанням динамічної моделі руху за допомогою апарату диференціальних перетворень. Одночасний розв'язок багатоточкової крайової задачі у часі і просторі вимірювань зі всіх ОЗС з використанням багатовимірних диференціальних перетворень дозволить підвищити оперативність розв'язку задачі за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій, спростити її при обранні складної моделі руху КО, а також підвищити точність визначення параметрів руху КО завдяки надмірності вимірювальної інформації та отримання даних про КО з різних, суттєво рознесених просторових напрямків.

За результатами аналізу імітаційного моделювання можна стверджувати, що точність визначення поточного положення КО в БпОК залежить від бази між вимірювачами, часу спостереження, а також точності розрахунків наближених початкових даних для другого ОЗС та кінцевого методу оцінювання визначених параметрів.

Таким чином, у рамках досліджень запропоновано підходи до оперативного (в межах одного витка) визначення параметрів руху КО в БпОК за допомогою математичного апарату диференціальних перетворень [6, 7], що дає змогу підвищити точність шуканих результатів у середньому у 4.5 рази порівняно з автономним ОЗС.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку оптимальних планів використання наявних оптичних засобів для отримання максимальних точнісних характеристик визначення параметрів руху КО та мінімальному застосуванню технологічного ресурсу.

1. Андреев Ф. М., Ковбасюк С. В. Возможности многопозиционного комплекса, созданного на базе национальных РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов // Космична наука і технологія. — 2009. — 15, № 5. — С. 74—81.
2. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008—2012 роки [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW>.
3. Ковбасюк С. В., Каневський Л. Б. Метод оперативного визначення параметрів руху космічного апарату оптичними засобами спостереження // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. — Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. — № 5. — С. 133—140.
4. Ковбасюк С. В., Писарчук О. О., Пономарьов Ю. В. Алгоритм визначення параметрів орбіт космічних апаратів за вимірами кутових координат // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. — Житомир: ЖВІРЕ, 2006. — № 10. — С. 34—40.
5. Нахмансов Г. С. Обработка широкополосных сигналов в многопозиционных радиосистемах // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков: ХНУРЕ, 2011. — Т. I (Ч. 1). — С. 252—255.
6. Пухов Г. Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. — К.: Наук. думка, 1986. — 159 с.
7. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и модели. — К.: Наук. думка, 1990. — 184 с.
8. Саваневич В. Є. Моделі та методи обробки даних при виявленні та оцінці параметрів траєкторій компактної групи малорозмірних космічних об'єктів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Харків: Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, 2006. — 38 с.
9. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 432 с.

Надійшла до редакції 15.03.12

S. V. Kovbasiuk, L. B. Kanevskyi

A METHOD OF TRAJECTORY PROCESSING FOR SPACECRAFTS IN MULTIPositional OPTICAL COMPLEX

We propose a method of the application of outer space monitoring optical means for the operative determination of spacecraft movement parameters with extended precision for the benefit of a national user of ballistic-navigational data. The main consideration is given to mathematical support of the cooperative processing of trajectory data during the multipositional optical complex development.

Т. П. Сумарук, П. В. Сумарук, Ю. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ e-mail: sumar@mail.lviv.ua

ГЕОМАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГЕТИКА МАГНІТОСФЕРИ У 19–24-МУ ЦИКЛАХ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Представлено результати зіставлення сонячної і геомагнітної активності та тісно пов'язану з ними енергетику магнітосфери в 19–23-му та на початку 24-го циклів сонячної активності. Оцінено кількість енергії, яка надійшла із сонячного вітру у магнітосферу за даними індексу $\Sigma(H - S_p)$. Показано зростання рекурентності геомагнітних збурень у мінімумах сонячної активності, що особливо добре проявилось на проміжку від листопада 2007 р. до січня 2009 р.

Останнім часом проблемам сонячно-земної фізики, зокрема проблемі глобальних змін клімату приділяється підвищена увага. Не підлягає сумніву, що клімат нашої планети залежить від Сонця і сонячної активності. Зокрема, зміна припливу енергії у магнітосферу Землі може призводити до аномальних змін клімату [1].

Дана робота присвячена аналізу змін енергії, що поступала із сонячного вітру у магнітосферу Землі за 19–24-й цикли сонячної активності.

Сонячна активність. Сонячна активність, як відомо, змінюється як циклічно, так і по фазі в циклі. Тривалість циклу визначається як час між двома послідовними мінімумами і становить: 11 років (цикл Швабе — Вольфа), 22 роки (цикл Хейла), 60–80, 100, 200, 360, 1000 років та інші [6].

Основними характеристиками, що описують сонячну активність, є числа Вольфа (характеризують кількість плям і їхніх груп), напруженість великомасштабного магнітного поля Сонця, парціальні індекси (ZE , ZO , SE), кут нахилу геліосферного струмового шару, індекс F_x (характеризує інтенсивність рентгенівських спалахів) та інші [8].

Розподіл плям по поверхні Сонця змінюється з фазою сонячного циклу. Після мінімуму активності новий цикл розпочинається появою груп плям на широтах $\pm 45^\circ$, з розвитком циклу

зона виходу нових плям дрейфує до екватора, при цьому середня широта плям зменшується із збільшенням їхнього числа. У максимумі активності середня широта складає $\pm 12^\circ$ з великим розкидом [8].

Магнітна полярність плям змінюється від циклу до циклу. В одному циклі головні плями мають одну і ту ж полярність в одній півкулі та протилежну — в іншій півкулі. У мінімумі циклу, як відомо, полярність плям змінюється, і деколи поряд з новими плямами зі зміненою полярністю на низьких широтах Сонця можна спостерігати плями, що залишились із попереднього циклу [7]. Таке явище спостерігалось на початку 24-го циклу. На рис. 1 приведено значення річних чисел Вольфа W з 1740 р. (дані з <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/YEARLY>). Найбільш чітко виражені 11-річні цикли сонячної активності. Окрім того, у спектрі сонячної активності легко виділяються цикли з періодами 80–100 р., а також 200–210 і 350–360 р. Таку саму періодичність виділено у роботі [6] та у роботі [18] на основі аналізу ізотопів ^{14}C та ^{10}Be . Для 19–23-го циклів сонячної активності характерними були максимальні значення чисел Вольфа W (для 19-го циклу $W = 190.2$), а також мінімальні значення $W = 3.1$ для 24-го циклу, названого «малим Маундерівським мінімумом» [18]. Мінімум 24-го циклу був одним з найменших за останні 250 років, подібні мінімумами були

у 6-му та 15-му циклах, що пояснюється впливом вікового та двовікового циклу [6]. Пізніше ми розглянемо, як ці екстремуми вплинули на геомагнітну активність.

Характерною особливістю досліджуваних 11-річних циклів є порушення правила «парних — непарних пар» циклів Гнєвишева — Оля. Правило полягає в тому, що парні цикли за амплітудою змін чисел Вольфа більш слабкі, ніж наступні за ними непарні. За останні 250 років це правило порушувалось для циклів 4—5, 8—9, 22—23.

У табл. 1 для різних періодів P показано роки початку останнього циклу, роки максимуму та характер змін у циклі в даний час. Як бачимо, тільки 11-річний та 80-річний цикли перебувають у фазі росту активності, більш потужні 200-річний та 360-річний цикли перебувають на фазі спаду, що призведе до зменшення амплітуд 11-річних циклів.

Геомагнітна активність. Як відомо, є два канали передачі енергії від Сонця до Землі: електромагнітне та корпускулярне випромінювання [7]. Електромагнітне (видимий та інфрачервоний діапазон хвиль) — постійне випромінювання, та корпускулярне випромінювання — змінна частина енергії. І хоча змінна частина енергії, що надходить від Сонця, становить 0.001 постійної, все ж вона є основним джерелом магнітних процесів, що відбуваються на Землі, зокрема магнітних бур, суббур та ін. Передача енергії відбувається за допомогою сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля (ММП).

Внаслідок наявності сонячних активних областей утворюються магнітогідродинамічні хвилі, корональні викиди маси, рекурентні корпускулярні потоки тощо. Всі ці явища беруть участь у формуванні короткохвильового випромінювання, збуреного сонячного вітру та ММП, котрі пізніше викликають появу магнітосферно-іоносферної системи струмів і геомагнітні збурення, що характеризують геомагнітну активність. Зрозумілим є те, що геомагнітна активність залежить від сонячної, а основною сполучною ланкою є сонячний вітер та вморожене в нього ММП. Параметри сонячного вітру змінюються в дуже широких межах і залежать від сонячної активності.

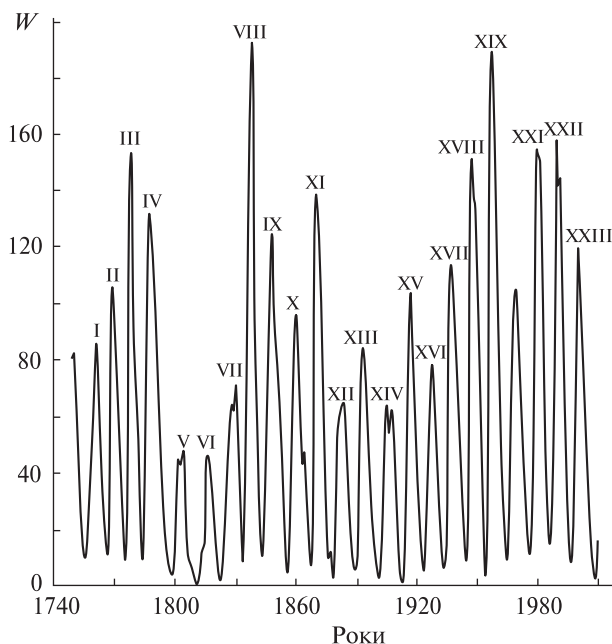


Рис. 1. Значення чисел Вольфа W у 1740—2010 рр.

Внаслідок взаємодії сонячного вітру із магнітосферою Землі в ній виникають системи струмів: авроральні електрострумені, струми на магнітопаузі, поздовжні струми, струми у хвості магнітосфери, система кільцевого магнітосферного струму і інші. Кожен з цих струмів найкраще відображається у варіації горизонтальної (північної складової магнітного поля Землі), що неперервно реєструється на магнітних обсерваторіях. Вклад кожного джерела у варіацію можна порахувати за даними обсерваторій і залежить від попереднього стану середовища [11, 12].

За рівень відліку поля іррегулярних варіацій нами обрано спокійну сонячно-добову варіацію S_q . Основним джерелом S_q -варіацій є великомасштабні переміщення іонізованих газів в іоносфері, зумовлені сонячними припливами

Таблиця 1. Періоди сонячної активності та характер їхніх змін

P , роки	Рік початку	Рік максимуму	Характер змін
11	2009	2013	Ріст
80—100	1976	2020	Ріст
200—210	1850	1956	Спад
350—360	~1750	~1900	Спад

та розігріванням іоносфери хвильовою радіацією Сонця [5, 14—16]. Величина S_q змінюється від одного дня до іншого по амплітуді та фазі, а також із зміною сонячної та геомагнітної активності.

Окрім того, на S_q -варіацію впливають магнітосферні джерела та ММП. Зміна форми S_q -варіації може бути передвісником підсилення геомагнітної активності [2, 3]. Розділення S_q -варіації від різних джерел було зроблено в роботі [10], де показано зміну цієї величини з сезоном та у циклі сонячної активності.

Основні механізми передачі енергії від сонячного вітру у магнітосферу [4] такі: проникнення плазми через полярні каспи, прорив плазми через бокові поверхні магнітосфери, а також гідромагнітні механізми — в'язка взаємодія та замикавання магнітних силових ліній на магнітопаузі.

У роботі [9] оцінено енергію сонячного вітру через полярні каспи, що розділяють магнітні силові лінії, котрі замикаються на денній стороні, та лінії, спрямовані у хвіст магнітосфери: вона становить $3 \cdot 10^{10}$ Дж/с. Такої енергії достатньо для виникнення магнітних суббур. Проникнення плазми сонячного вітру у магнітосферу через бокову поверхню може відбуватися як на вечірній, так і на вранішній стороні, якщо напруженість магнітного поля у перехідній зоні більша за напруженість поля всередині магнітосфери. При цьому плазма перехідної зони і магнітосфери перемішуються. Плазма, яка таким чином проникла у магнітосферу, пізніше переноситься у плазмовий шар унаслідок дрейфу, зумовленого градієнтом магнітного поля.

Енергетичний баланс магнітосфери можна зобразити у вигляді суми потужностей дисипаційних процесів, що відбуваються у магнітосфері, іоносфері та атмосфері Землі. Виділяють [13] такі процеси: джоульське нагрівання високоширотної іоносфери (потужність U_j), висипання заряджених частинок в овалі полярних сьйв (U_a), дисипація їх у кільцевий струм (U_{DR}) та у хвіст магнітосфери (U_T). Для розрахунку потужності U_j необхідні значення електричного поля та провідності іоносфери із супутникових вимірювань. Величину електричного поля та струм у високоширотній іоносфері можна визначити за

моделями, що пов'язують геомагнітні варіації з параметрами сонячного вітру.

Значення дисипації енергії в іоносфері оцінюють за напівемпіричними формулами, що пов'язують величини потоків частинок у зоні овалу полярних сьйв, виміряних супутниками, з AE -індексами (auroral electrojet) геомагнітної активності.

Так, енергію, витрачену на джоульське нагрівання іоносфери, можна оцінити за формулою [13]

$$U_j = 0.32AE \cdot 10^9, \quad (1)$$

енергію, витрачену на збільшення енергії авроральних частинок [13, 17] — за формулою

$$U_a = (1.75AE/100 + 1.6) \cdot 10^{10}, \quad (2)$$

(AE — в нанотеслах, а U_j і U_a — у ватах); величину дисипації енергії із кільцевого струму U_{DR} [13] — з виразу

$$U_{DR} = -0.74(dDR/dt + DR/\tau) \cdot 10^{10}, \quad (3)$$

де τ — стала розпаду кільцевого струму, яка змінюється залежно від фази магнітної бури.

Величину DR (disturbance radial) оцінюють як різницю між D_{st} та DCF :

$$DR = D_{st} - DCF = D_{st} - c\sqrt{n \cdot v^2}, \quad (4)$$

де n — концентрація частинок, v — швидкість сонячного вітру.

Розрахунок величини дисипації енергії у хвості магнітосфери (U_T) складний через те, що просторово-часовий розподіл полів та струмів неможливо одержати. Тому величину U_T одержують за моделями струмів у хвості магнітосфери.

В усіх вищезгаданих дисипаційних процесах у магнітосфері витрачається енергія, яка надходить із сонячного вітру. Визначити її експериментально на кількісному рівні неможливо, тому припускають [9], що повна енергія, яка надходить із сонячного вітру у магнітосферу, дорівнює

$$U = U_j + U_a + U_{DR} + U_T. \quad (5)$$

Для дослідження величини енергії, що поступила у 19—24-му циклах сонячної активності, ми використали добову суму $\Sigma(H - S_q)$, де H — значення горизонтальної складової гео-

магнітного поля (за даними середньоширотних геомагнітних обсерваторій «Львів», «Бельськ», «Київ»), S_q — значення цієї ж складової по п'яти міжнародно-спокійних днях. Суму беремо за місяць та знаходимо середнє значення за рік по всіх місяцях. Таким чином, було враховано всі збурення (а отже, і доплив енергії) та виключено варіації, пов'язані з динамо-струмами та із сезонними варіаціями.

Порівнявши добову суму $\Sigma(H - S_q)$ із іншими індексами геомагнітної активності AE , K_p , ми отримали високу кореляцію ($r = 0.8 - 0.9$) і запропонували використовувати його як індекс геомагнітної активності [19], що оперативно вираховується за даними середньоширотної обсерваторії.

Замінивши у формулах (1), (2) індекс AE на добову суму $\Sigma(H - S_q)$ (приведену до середньорічних значень), ми розрахували значення енергії, що поступила за 19–24-й цикли сонячної активності. Як бачимо з рис. 2, кількість енергії, що поступила із сонячного вітру у магнітосферу, має чітко виражену 11-річну циклічність (чітко прослідковується вплив 11-річних циклів сонячної активності). Максимуми енергії відповідають максимумам чисел Вольфа, чітко виражено вплив 80–100 річного циклу.

У табл. 2 представлено середньомісячні величини енергії, що поступала у магнітосферу у роки мінімумів (початки 19–24-го циклів), со-

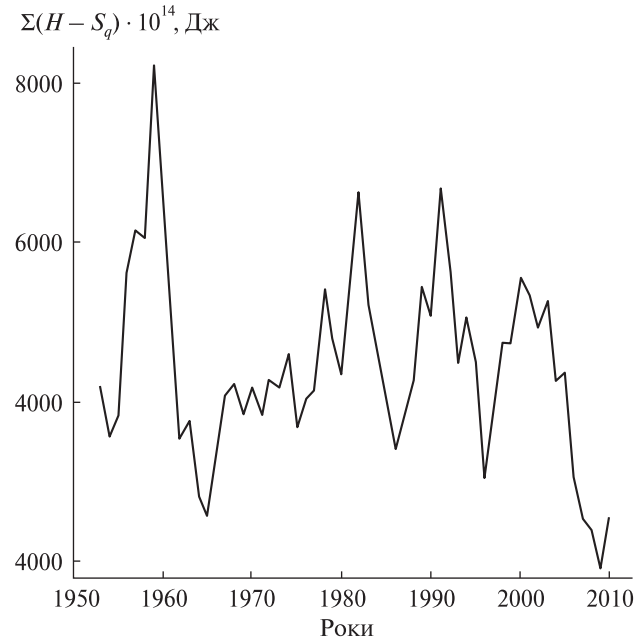


Рис. 2. Середньорічна кількість енергії, що поступила у магнітосферу із сонячного вітру за 19–24-й цикли сонячної активності

нячної та геомагнітної активності. Ця енергія прямо пропорційна кількості всіх геомагнітних збурень, що протікали в дані роки. Величина середньої за рік енергії, що поступала у мінімуми 19–24-го циклів, найменша у 2009 р., і у 1.5–2 рази менша за відповідні величини у всіх спостережуваних мінімумах. Це підтверджує дані ін-

Таблиця 2. Середньомісячні значення допливу енергії у мінімуми 19–24-го циклів, виражене у 10^{14} Дж

Місяці/роки	1955	1965	1975	1986	1996	2009
1	2529	1943	4259	4127	2665	1807.7
2	2974	2352	3441	3997	2592	2227.5
3	4638	2345	5426	3676	3352	2008
4	5158	3145	3555	2241	3814	1436.7
5	5027	2565	3133	3637	2514	1817.7
6	2421	3232	2818	2802	2358	2086.5
7	2581	2727	2925	3001	2636	2487.1
8	3070	2394	2591	3237	2649	1805
9	3623	2945	3021	3319	3792	1725.4
10	4057	2062	3945	3097	4115	2141.1
11	4876	2306	5518	5146	2755	1899.9
12	5011	2898	3486	2561	2843	1453.5
Середнє	3830	2576	3677	3403	3007	1908

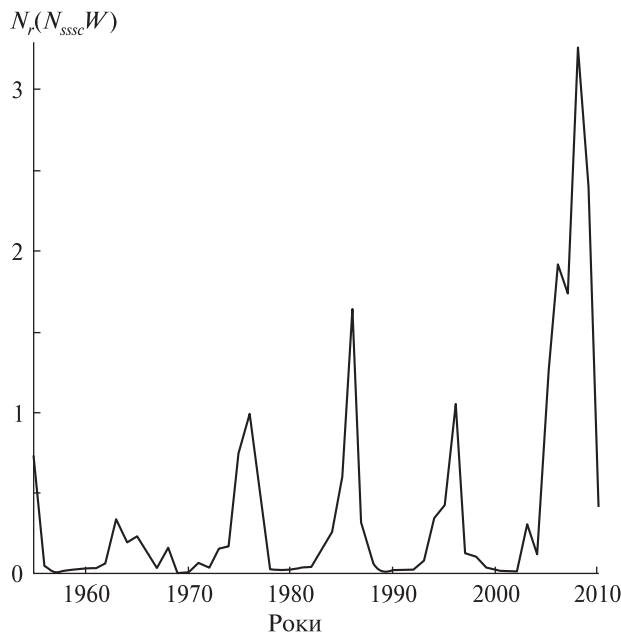


Рис. 3. Відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень та кількість бур з раптовим початком, проновормована на величину чисел Вольфа

ших досліджень [18] про «малий маундерівський мінімум».

Характерною була і кількість рекурентних геомагнітних збурень для 19-го та 24-го циклів сонячної активності. Рекурентними вважались збурення, котрі повторювались два і більше разів у 27-денному циклі. Максимальна рекурентність спостерігалась для 2378—2395 обертів Сонця (по Бартельсу) з 23 листопада 2007 р. до 27 січня 2009 р. В цей час кількість спалахів на Сонці була надзвичайно низькою, хоча збурення магнітного поля Землі спостерігались. Рекурентні геомагнітні збурення повторювались у 17 обертах Сонця. Збурення виникали у 1—4-й дні та 16—20-й дні бартельського оберту. Очевидно, вони виникали внаслідок рекурентних довготривалих потоків сонячної плазми (наприклад корональних дір), що перебували на активних довготах Сонця.

На рис. 3 показано відношення кількості N_r рекурентних геомагнітних збурень до кількості N_{ssc} бур з раптовим початком. Для виключення впливу 11-річного сонячного циклу відношення N_r/N_{ssc} проновормовано на величину чисел Воль-

фа W за 19—24-й цикли сонячної активності. Як бачимо, свого максимуму відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень набула у 2009 р. Відношення N_r/N_{ssc} є більшим у 1.5—4 рази за попередні мінімуми сонячної активності. В даному випадку прослідковується вплив 22-річного циклу сонячної активності.

Кількість бур з раптовим початком (SSC) прямо пропорційна числам Вольфа. Слід зазначити зростання у максимумах кількості бур з раптовим початком від циклу до циклу. Зменшення чисел Вольфа від 21-го до 24-го циклу привело до збільшення рекурентності збурень у мінімумах цих циклів. Очевидно, можна спрогнозувати відповідне збільшення кількості рекурентних збурень із зменшенням чисел Вольфа.

Поява у 2010—2011 рр. бур з раптовим початком (за даними геомагнітних обсерваторій) свідчить про те, що мінімум 24-го циклу закінчився, і ми наближаємось до максимуму сонячної активності та геомагнітної активності.

ВИСНОВКИ

Геомагнітна активність, а отже, і кількість енергії, що надходить у магнітосферу Землі, чітко залежить від сонячної активності. У досліджуваний період (19—24-й цикли сонячної активності) найменша кількість енергії поступала у магнітосферу у 2009 р. і була у 1.5—2 рази менша за мінімуми 19—23-го циклів.

Велика кількість рекурентних геомагнітних збурень спостерігалась у мінімумі 24-го циклу при малих значеннях чисел Вольфа. Відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень набула максимальної величини у 2009 р. Значення відношення N_r/N_{ssc} є більшим у 1.5—4 рази, ніж значення за попередні мінімуми сонячної активності.

Зменшення річних чисел Вольфа від 21-го до 24-го циклу привело до збільшення рекурентних збурень у мінімумах цих циклів. Можна прогнозувати відповідне збільшення кількості рекурентних збурень зі зменшенням чисел Вольфа.

1. Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. — 2000. — **40**, № 5. — С. 3—14.

2. Афанасьева В. И. Корпускулярная природа изменчивости ото дня ко дню спокойных солнечно-суточных геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. — 1961. — **1**, № 4. — С. 712–716.
3. Афанасьева В. И. Изменчивость ото дня ко дню спокойных солнечно-суточных вариаций и направление межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. — 1973. — **13**, № 1. — С. 175–178.
4. Ковалевский И. В. Энергетические аспекты солнечно-земных связей. — М: Наука, 1976. — 51 с.
5. Козаков В. В. Влияние регулярных магнитосферных токов на сезонную вариацию координат фокуса S_q -токовой системы // Ионосфера и солнечно-земные связи. — Алма-Ата, 1980. — С. 139–144.
6. Комитов Б. П., Кафтан В. И. Изменение солнечной активности последних тысячелетий. Возможен ли очередной долгопериодический солнечный минимум // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 592–601.
7. Космическая геофизика. — М.: Мир, 1976. — 544 с.
8. Кременецкий И. О, Черемных О. К. Космічна погода. — Київ: Наук. думка, 2009. — 142 с.
9. Левитин А. Е. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой // Изв. РАН. Сер. физ. — 2006. — **70**, № 10. — С. 1525–1533.
10. Сумарук Т. П., Сумарук Ю. П. Про джерела S_q -варіацій геомагнітного поля в середніх широтах // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 2. — С. 299–303.
11. Сумарук Т. П., Сумарук Ю. П. До питання енергетики магнітосфери на різних рівнях сонячної та магнітної активності // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 116–121.
12. Сумарук Ю. П. Залежність величини варіацій геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 1. — С. 39–42.
13. Akasofu S. I. Energy coupling between solar wind and magnetosphere // Space Sci. Revs. — 1982. — **28**. — P. 121–190.
14. Butcher E. S., Brown G. M. Abnormal quiet days and effect of the IMF on the apparent position of the S_q -focus // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1980. — **63**, N 3. — P. 783–789.
15. Butcher E. S., Brown G. M. On the nature of the abnormal quiet days in $S_q(H)$ // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1980. — **64**, N 2. — P. 513–526.
16. Butcher E. S., Brown G. M. The variability of $S_q(H)$ on normal quiet days // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1981. — **64**, N 2. — P. 527–537.
17. Feldstein Y. I. Modeling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // Space Sci. Revs. — 1992. — **59**. — P. 83–165.
18. Vaquero J. M., Gallego M. C., Usoskin I. G., Kovaltsov G. A. Revisited sunspot data: a new scenario for the onset of the maunder minimum // Astrophys. J. Lett. — 2011. — **731**: L24 (4pp), doi:10.1088/2041-8205/731/2/L24.
19. Sumaruk T., Sumaruk Yu. The New Index of Geomagnetic Activity // Pubs. Inst. Geophys. Polish Acad. Sci. Monographic vol. — 2007. — **C-99** (398). — P. 374–379.

Надійшла до редакції 11.11.11

T. P. Sumaruk, P. V. Sumaruk, Yu. P. Sumaruk

GEOMAGNETIC ACTIVITY AND ENERGETICS OF THE MAGNETOSPHERE DURING THE 19–24th SOLAR ACTIVITY CYCLES

We present some results of our comparison of the solar and geomagnetic activities and the magnetosphere energetics closely connected to them from the 19th to 23th and at the beginning of the 24th solar activity cycles. The quantity of the solar wind energy transported into the magnetosphere is estimated with the use of $\Sigma (H - S_q)$ indices. Some increase of the geomagnetic disturbance recurrence at solar activity minimums is shown. The phenomenon was most pronounced from November 2007 till January 2009.

А. Н. Кришталь, С. В. Герасименко, А. Д. Войцеховская

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ПРЕДВСПЫШЕЧНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ХРОМОСФЕРЕ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА

Були досліджені умови появи і розвитку іонно-звукової нестійкості в передспалаховій плазмі петельної структури в активній області. Дослідження проводилися в рамках напівемпіричної моделі FAL сонячної атмосфери. На ділянці струмового контура петлі поблизу її основи передбачалася наявність субдрейсерівського електричного поля і паралельного йому магнітного «кілогауссового» поля. Показано, що дрібномасштабна іонно-звукова нестійкість з низьким порогом збудження по амплітуді субдрейсерівського поля може виникнути в досліджуваній області до настання фази «попереднього нагрівання». Показано, що в рамках концепції, що використовується, зниження порога збудження нестійкості можливо тільки при підвищенні ступеня неізотермічності плазми.

ВВЕДЕНИЕ

Сам факт существования токовых слоев в атмосфере активной области (АО) Солнца перед вспышкой чрезвычайно важен с точки зрения «ранней диагностики» и ее краткосрочного прогноза [4]. Несмотря на стремительный прогресс методов и средств наблюдения, необходимых свидетельств существования подобных объектов по-прежнему мало. Зато каждое надежно зафиксированное их появление вносит существенное дополнение в картину ранней стадии развития вспышечного процесса в АО [6, 14]. Так, исследования распределения радиояркости, проведенные на радиогелиографе в Нобееме [2, 3] и в рамках миссий SOHO и TRACE [6], позволили обнаружить области первичного энерговыделения вблизи основания петель [2, 3]. Отдельные события были зафиксированы буквально за несколько минут до начала импульсной фазы [2, 3]. Известно, что наилучшее согласие величин, предсказываемых в модели ненейтрального высокотурбулентного токового слоя (ВТТС), с наблюдаемыми величинами в солнечных вспышках получается в случае порогового режима ионно-звуковой турбулентности [4, 5]. При этом

данная турбулентность должна развиваться из соответствующей неустойчивости с предельно низким порогом возбуждения, иначе ВТТС не сможет обеспечить необходимой мощности, выделяемой во вспышке [5, 15]. В роли таких «триггеров» обычно использовались градиентные плазменные неустойчивости [5]. В режиме насыщения ионно-звуковой турбулентности, как показали расчеты [5, 15], могут достигаться еще большие, чем в пороговом режиме, скорости магнитного пересоединения и мощности энерговыделения ВТТС [4].

В относительно плотной и «холодной» предвспышечной плазме вблизи основания петли, где ее токовый контур находится в области, соответствующей по высоте нижней хромосфере и переходному слою, роль такого низкопорогового триггера может взять на себя ионно-звуковая неустойчивость, вызванная наличием слабого субдрейсеровского поля [8, 11, 15]. При этом, как это было показано в работах [5, 11], для построения самосогласованной и реалистичной модели процесса одинаково важными являются граничные (пороговые) значения и амплитуды квазистатического электрического (субдрейсеровского) поля, и степень неізотермічності плазми (т. е. значение отношения электронной температуры к ионной).

Модель вспышки «со всплывающим магнитным потоком» Хейвартса — Приста — Раста [9], предложенная более тридцати лет назад, по-прежнему остается наиболее популярной. В качестве одного из важнейших элементов в ней выступает предположение о наличии фазы «предварительного нагрева», которая предваряет начало импульсной фазы. Во время этого «разогрева», как следует из оценок, полученных авторами, в плазме возникает бунемановская неустойчивость, переводящая плазму в турбулентное состояние. Плазма быстро нагревается, электронная температура стремительно опережает в своем росте ионную, что приводит к зарождению ионно-звуковой неустойчивости, также быстро переходящей в ионно-звуковую турбулентность, столь необходимую для образования ВТТС [1, 4, 5]. Существенным недостатком такого сценария является то, что образовавшиеся токовые слои должны быть неправдоподобно тонкими, меньше одного метра толщиной, тогда как их длина и ширина должны быть на 6—7 порядков больше [4, 5]. В результате энергии в таком «накопителе» будет существенно меньше, чем освобождается во время вспышки [6—8, 15]. Наиболее популярные подходы для решения проблемы — это поиск модели ВТТС либо с существенно большей толщиной, в которой перекрывается энергетический дефицит за счет увеличения объема области пересоединения [4, 6, 7, 9], либо с низким порогом возбуждения неустойчивости (а следовательно, и турбулентности), чтобы необходимая энергия успела накопиться за увеличенное таким образом время жизни токового слоя [5, 6, 15]. Так, в свое время в работах [4, 5] в качестве возможного триггера турбулентности были предложены различные дрейфовые неустойчивости с экстремально низкими порогами возбуждения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ КОНЦЕПЦИИ

Исследования, проведенные в работах [10—12], позволили не только получить достаточно полную картину процесса зарождения и развития неустойчивостей различных типов волн в предвспышечной плазменной атмосфере АО, но и сформулировать оригинальную концепцию ис-

следования этих мелкомасштабных неустойчивостей [10, 11]. В ее основе лежит экспериментально обнаруженный факт — дополнительное штатковское уширение линий H_{β} бальмеровской серии с большими номерами ($N \geq 8$) [8], что было интерпретировано [6, 8, 15, 17] как проявление действия слабого крупномасштабного электрического поля, существующего и «квазистатически медленно» изменяющегося в отдельных частях атмосферы АО на протяжении достаточно длительных промежутков времени. Использование в качестве вышеупомянутых частей атмосферы АО относительно небольших участков вспышечных петель вблизи их основания, которые приблизительно соответствуют ниже-средней хромосфере, позволяет эффективно и обоснованно использовать некоторые полезные приближения [1, 12]. Так, в рассматриваемом диапазоне высот над уровнем фотосферы

$$600 \leq h \leq 1400 \text{ км} \quad (1)$$

плазму на вполне законных основаниях можно считать «плотной» и «холодной»:

$$3 \cdot 10^{10} \text{ см} \leq n_e = n_i \leq 5 \cdot 10^{11} \text{ см}, \quad (2)$$

$$5000 \text{ К} \leq (T_e)_0 = (T_i)_0 \leq 8000 \text{ К}. \quad (3)$$

В соотношениях (2)—(3) $n_e = n_i = n$ есть плотность заряженных частиц плазмы, а само равенство $n_e = n_i$ есть условие ее квазинейтральности [1]. Для низкочастотных колебаний и волн в плазме это условие всегда выполняется с большим запасом [1]. Условие $(T_e)_0 = (T_i)_0$ для ионной и электронной температур можно рассматривать в некотором смысле как начальное для процесса развития ионно-звуковой неустойчивости, поскольку известно, что ионно-звуковая волна, генерируемая этой неустойчивостью, тем слабее затухает, чем более неизотермичной является плазма, т. е. должно выполняться условие

$$T_e = \Theta T_i, \quad (4)$$

где $\Theta \geq 3$ [1]. Для «обычной», классической плазмы без внешних электромагнитных полей ($\mathbf{E}_0 = 0$, $\mathbf{B}_0 = 0$) выполняется соотношение для частот взаимных столкновений заряженных частиц [1, 16]

$$v_{ee} \gg v_{ei} \gg v_{ii}, \quad (5)$$

где индексами «e» и «i» обозначены электроны

и ионы соответственно. При «включении» внешнего магнитного поля ($\mathbf{B}_0 \neq 0$) и параллельного ему слабого электрического поля ($\mathbf{E}_0 \neq 0$) соотношение (5) несколько изменится. Из общих соображений ясно (хотя эта гипотеза требует отдельного серьезного исследования), что «выстроившиеся» вдоль направления полей и движущиеся друг навстречу другу электроны и ионы будут чаще сталкиваться с частицами противоположного знака, чем с частицами одного знака. Поэтому, если дополнительно будет выполняться условие

$$v_{ei} \gg v_{0e}, v_{0i}, \quad (6)$$

связывающее частоту электронно-ионных столкновений v_{ei} с частотами v_{0e} и v_{0i} столкновений заряженных частиц с нейтральными атомами, то суммарный вклад всех видов столкновений в модельный интеграл БГК [1], стоящий в правой части уравнения Больцмана, можно записать символически в виде

$$\sum_{\alpha, \beta} v_{\alpha, \beta} = \sigma v_{e, i}, \quad (\alpha, \beta = e, i), \quad (7)$$

где числовой параметр σ изменяется в пределах

$$1 \leq \sigma \leq \sigma_{\max} \quad (8)$$

и фактически является свободным параметром задачи. Значение $\sigma=1$ соответствует ситуации, максимально благоприятной для развития неустойчивости, когда электронно-ионные столкновения полностью доминируют в плазме, а значение $\sigma=\sigma_{\max}$ соответствует ситуации, когда зародившаяся неустойчивость полностью подавляется кулоновскими столкновениями [10, 11]. Подобный феноменологический подход является вполне корректным с точки зрения исследования устойчивости волн [1, 11, 16] в плазме, однако он, конечно, не является достаточно строгим с точки зрения микрофизики процесса диссипации энергии этих волн.

Условие слабости крупномасштабного электрического поля, предложенное Пайнсом и Шриффером [16]

$$\frac{e|\mathbf{E}_0|}{k_z k_B T_\alpha} \ll 1 \quad (\alpha = e, i) \quad (9)$$

для плазмы с плотностью и температурой, изменяющимися в интервалах (2) и (3), является ме-

нее жестким, чем условие

$$\varepsilon_R \equiv \frac{E_0}{E_D} = \frac{u_e}{v_{Te}} \ll 1, \quad (10)$$

использованное в работах [11, 15]. В соотношениях (9) и (10) E_0 — амплитуда квазистатического электрического поля в плазме, E_D — амплитуда локального дрейсерского поля [1], e — заряд электрона, v_{Te} — электронная тепловая скорость, k_B — константа Больцмана, k_z — продольная (вдоль полей $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{B}_0$) составляющая волнового вектора возмущения. Отметим, что условие (10) прямо противоположно условию появления бунемановской неустойчивости [1]. Поля, удовлетворяющие этому условию, получили название «субдрейсерских» [15].

В соотношении (10) u_e есть токовая скорость электронов относительно считающихся неподвижными ионов, причем

$$u_e = \frac{eE_0}{m_e v_{ei}}. \quad (11)$$

Как обычно, для ионно-звуковых волн выполняется условие

$$v_{Ti} \ll \left| \frac{\omega}{k_z} - u_e \right| \ll v_{Te}, \quad (12)$$

где v_{Ti} — тепловая скорость (однозарядных, т. е. $Z=1$) ионов. В расчетах предполагалось, что поправки, связанные с учетом столкновений, не вносят существенных искажений в стандартный закон дисперсии [1]:

$$\omega_r^2 = \frac{k_z^2 v_s^2}{1 + k_L^2}, \quad k_L \equiv k_z d_e \leq 2\pi. \quad (13)$$

Здесь ω_r — действительная часть частоты, v_s — скорость ионного звука [1], d_e — дебаевский электронный радиус [1]. Вторая часть соотношения (13) означает, что плазменное приближение хорошо работает только для таких волновых возмущений, у которых длина волны превышает дебаевский радиус [1]. Кривизной и кручением магнитных силовых линий можно пренебречь лишь в том случае [12], когда выполняется соотношение

$$\sqrt{\frac{\beta_i}{8}} \ll \frac{|k_z| \rho_i}{\varepsilon_R \beta_A}, \quad \beta_A \equiv \frac{v_{Te}}{v_A}. \quad (14)$$

Здесь $\beta_i = \frac{8\pi n k_B T_i}{B_0^2}$ — ионное «плазменное бета» [1], $\rho_i = \frac{v_{Ti}}{\Omega_i}$ — ионный циклотронный радиус; Ω_i — ионная циклотронная частота. Для плазмы с характеристиками (2) и (3) неравенство (14) выполняется всегда в области действия «килогауссовых» магнитных полей $\mathbf{B}_0$ [17], где альвеновская скорость v_A достаточно велика. Для ионно-звуковых плазменных волн, распространяющихся в плазме с кулоновскими столкновениями, величина магнитного поля роли не играет [1]. А вот при распространении волны на фоне бернштейновской (например) турбулентности, когда основная потеря импульса электронами происходит на ее пульсациях, выполнение или невыполнение критерия (14) становится важным моментом в исследовании. При распространении ионно-звуковых волн вблизи центральной области поперечного сечения петли плазму с хорошей степенью точности можно считать однородной. Слабая неоднородность как температуры, так и плотности проявляется только при приближении к пространственной границе между более плотной плазмой тела петли и окружающей атмосферой АО. Пренебречь влиянием границ можно при условии выполнения критерия Михайловского [1]

$$(k_{\perp} L)^{-1} \ll \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} \frac{1}{\beta_i}, \quad (15)$$

где m_i — масса однозарядного иона, L — характерный пространственный размер неоднородности, $k_{\perp}$ — перпендикулярная составляющая волнового вектора $\mathbf{k}$ ($k^2 \equiv k_z^2 + k_{\perp}^2$). Для чисто продольной волны, каковой является ионно-звуковая (ИЗ) волна, $k_{\perp} = 0$ и критерий (15) выполняется автоматически. И наконец, весьма важным моментом при исследовании данной неустойчивости оказалось условие, позволяющее не учитывать влияние создаваемого электрическим полем потока «убегающих» электронов [1]. При выполнении критерия (10) отношение числа «убежавших» электронов к общему их числу можно оценить с помощью достаточно простой формулы [1]

$$\frac{N_{yb}}{N_e} \approx \frac{1}{2\pi} \exp(-\varepsilon_R^{-1}). \quad (16)$$

Фактически соотношение (16) позволяет оценить верхний предел для величины $\varepsilon_R \ll 1$. Непросто убедиться в том, что при $\varepsilon_R \geq 0.2$ величина $N_{yb} / N_e \sim 10^{-3}$, а в этом случае пренебречь влиянием обычной пучковой неустойчивости уже нельзя. Таким образом, если в предвспышечной плазме для какого-либо типа волны порог возбуждения неустойчивости по амплитуде субдрейсеровского поля составляет, например, $(\varepsilon_R)_{\text{пр}} = 0.15$, что формально вполне отвечает условию (10) ($\varepsilon_R \ll 1$), то это означает, что с точки зрения общей концепции исследований, все расчеты будут выполняться на пределе применимости используемых приближений. И конечно, особое значение приобретает поиск возможностей и путей понижения этого порога именно в рамках используемой концепции.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дисперсионное уравнение для ионно-звуковых волн в плазме с внешним слабым электрическим полем было впервые получено в работе [16] для твердотельной плазмы полупроводников. Его различные модификации для «обычной» лабораторной плазмы можно найти в монографии [1]. В виде, пригодном для использования в предвспышечной плазме, и с учетом вклада всех типов парных кулоновских столкновений в рамках оригинальной концепции исследований это уравнение было получено в работе [11]. Оно имеет вид

$$D_E^{из}(\omega, \mathbf{k}) = \text{Re } D_E^{из}(\omega, \mathbf{k}) + i \text{Im } D_E^{из}(\omega, \mathbf{k}) = 0,$$

где

$$\text{Re } D_E^{из}(\omega, \mathbf{k}) = 1 + x_e^2(1 - y_e^2) - \frac{x_i^2}{y_i^2} \left(1 + \frac{3}{y_i^2} \right),$$

$$\text{Im } D_E^{из}(\omega, \mathbf{k}) =$$

$$= x_e^2 \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2}} y_e \exp\left(-\frac{y_e^2}{2}\right) - \frac{eE_0}{k_z k_B T_e} \right\} + \\ + \frac{x_i^2}{y_i^2} \left\{ \tilde{v} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} y_i^3 \exp\left(-\frac{y_i^2}{2}\right) + \frac{3eE_0}{m_i \omega^2} \right\},$$

причем

$$x_{\alpha} \equiv \frac{\omega_{p\alpha}}{k_z v_{T\alpha}} \quad (\alpha = e, i),$$

$$y_\alpha \equiv \frac{\omega - k_z u_\alpha}{k_z v_{T\alpha}},$$

$$u_e \equiv \frac{eE_0}{m_e v_{ei}} (u_i \equiv 0).$$

В расчетах предполагалось, что

$$\tilde{v} = \frac{v_{ei}}{\omega} \sigma$$

в ситуации, максимально благоприятной для развития неустойчивости, и что

$$\tilde{v} = \frac{8 k_z^2 v_{Ti}}{5 \omega^2} \frac{v_{ii}}{\omega} + \frac{v_{ei}}{\omega} \sigma$$

в противоположном случае.

Инкремент развития неустойчивости определялся по стандартной формуле [1]

$$\delta = - \frac{\text{Im } D_E^{ИЗ}(\omega, \mathbf{k})}{\left. \frac{\partial}{\partial \omega} \text{Re } D_E^{ИЗ}(\omega, \mathbf{k}) \right|_{\omega=\omega_r}},$$

где ω_r определяется по формуле (13). В единицах плазменной частоты ω_{pe} инкремент имеет вид [11]

$$\frac{\delta}{\omega_{pe}} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \mu k_L \frac{G_E}{P_E},$$

где

$$\mu \equiv \sqrt{m_e / m_i} \approx 0.0233,$$

$$G_E = - \left(\frac{2k_*}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\{\epsilon_R \mu (2 + 6k_L^2 + 3k_L^4) + \sigma k_*^{3/2}\}}{\omega_{pe} k_L \mu} v_{ei} -$$

$$- \Theta^{3/2} \exp \left(- \frac{\Theta}{2k_*} \right) +$$

$$+ (\epsilon_R k_*^{1/2} - \mu) \exp \left\{ - \frac{1}{2} (\mu k_*^{1/2} - \epsilon_R)^2 \right\}, \quad (17)$$

$$P_E = k_*^2 \{1 + 6k_* \Theta^{-1}\} + \mu (\epsilon_R k_*^{1/2} - \mu).$$

Здесь использовано обозначение

$$k_* = 1 + k_L^2.$$

Частота электронно-ионных столкновений v_{ei} определялась по стандартной формуле [1], где величина кулоновского логарифма «обрезания» $\ln \Lambda$ изменялась в зависимости от плотности и температуры плазмы в пределах от 13 до 19. В случае развития ионно-звуковой неустойчи-

вости на фоне насыщенной бернштейновской турбулентности величину v_{ei} в формуле (17) заменяла эффективная частота столкновений $v_{эф}$ электронов с пульсациями турбулентности. В используемых обозначениях она определяется выражением [11]

$$v_{эф} = 10^{-1} \Omega_e \left(\frac{u_e}{v_{Te}} \right) = \frac{\Omega_e \epsilon_R^2}{10}.$$

Вычисления инкрементов развития ионно-звуковой неустойчивости были проведены для четырех модификаций модели атмосферы FAL [7], а именно FAL F(1)_p, FAL F(2)_p, FAL E(1)_p и FAL E(2)_p. Как известно, различия между моделями FAL, учитывающими процесс диффузии гелия, и ранее использовавшимися в расчетах моделями атмосферы MAVN [13] и VAL [18], увеличиваются с увеличением высоты над уровнем фотосферы. В данной работе были использованы модификации модели FAL [7], соответствующие по высоте нижней и верхней границе интервала (1) исследуемого участка токового контура петли. Основные физические характеристики предвспышечной плазмы в ниже-средней области хромосферы АО приведены в табл. 1.

Учитывая традиционные трудности в определении значения полного вектора магнитного поля в хромосфере [4, 6, 9, 13, 17], в расчетах предполагалось, что исследуемый участок токового контура петли находится в области «килогауссовых» (по терминологии С. Шоланки [17]) полей «квазидипольного» типа, т. е. с высотой напряженность магнитного поля уменьшается. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3, причем в табл. 2 приведены граничные значения основных характеристик ионно-звуковой неустойчивости при полном доминировании в плазме электронно-ионных парных кулоновских столкновений, т. е. в ситуации, максимально благоприятной для возникновения и развития неустойчивости.

Символом $\Gamma_{l(+)}$ обозначено «первое положительное» значение приведенного инкремента $\Gamma \equiv \frac{\delta}{\omega_{pe}}$, появляющееся при переходе поверхности $\Gamma = \Gamma(\Theta, k_L)$ через линию $\Gamma = 0$ и выходе в положительное полупространство. Наличие

линии $\Gamma = 0$ свидетельствует о возможности перехода процесса развития неустойчивости (или процесса затухания волн) в режим непрерывной генерации незатухающих ионно-звуковых колебаний малой амплитуды (т. е. незначительно превышающей уровень тепловых шумов). Малость значений величины $\Gamma_{l(+)}$ свидетельствует о том, что переход этот происходит «плавно», без резких скачков, а колебательный процесс по обе стороны разделяющей линии $\Gamma = 0$ является высокочастотным, т. е. инкремент (декремент) развития неустойчивости намного меньше основной частоты. Это означает, что на временном интервале, соответствующем линейной стадии развития возмущения, уместается большое количество периодов волн, и то, что данный про-

цесс может быть надежно идентифицирован именно как волновой [1]. Анализ результатов вычислений, приведенных в табл. 2, показывает, что «классическая» (т. е. без учета кинетических эффектов) ионно-звуковая неустойчивость в предвспышечной плазме петли с кулоновской проводимостью может развиваться только на максимальных высотах, вблизи верхней границы выбранного интервала, да и то с трудом. Граничные значения величин ε_R и k_L указывают на то, что данная модель процесса работает вблизи границ применимости используемых приближений, а граничные значения степени неизо-термичности плазмы $\Theta_{ip} = 15$ и $\Theta_{ip} = 17$ свидетельствуют о том, что за счет только обычного Джоулева нагрева «раскачать» такую неустойчи-

Таблица 1. Физические характеристики предвспышечной плазмы на ниже-хромосферном участке токового контура петли в активной области

Модель атмосферы	$n_e, 10^{11} \text{ см}^{-3}$	$(T_e)_0 = (T_i)_0, \text{ K}$	$B_0, \text{ мТл}$	$h, \text{ км}$	$\omega_{pe}, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$\Omega_e, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$\nu_{ei}, 10^7 \text{ с}^{-1}$
FAL F(1) _p	2.5	5220	321	650	2.81	5.64	2.56
FAL F(2) _p	3.02	5480		700	3.10		2.89
FAL E (1) _p	4.79	7420	145	1380	3.80	2.56	1.23
FAL E (2) _p	0.31	6150		1375	0.97		0.093

Таблица 2. Граничные значения основных характеристик ионно-звуковой неустойчивости при доминировании в плазме электронно-ионных столкновений ($\sigma_{ка} = 1$)

Модель атмосферы	$h, \text{ км}$	$(\varepsilon_R)_{ip}$	$(k_L)_{ip}$	$\Theta = (T_e/T_i)_{ip}$	$\Gamma_{l(+)\text{min}}$
FAL E (1) _p	1380	0.1	0.21	17	$8.20 \cdot 10^{-7}$
FAL E (2) _p	1375	0.1	0.11	15	$1.25 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3. Граничные значения основных характеристик развития ионно-звуковой неустойчивости на фоне насыщенной бернштейновской турбулентности ($\sigma_{эф} = 1$)

Модель атмосферы	$h, \text{ км}$	$(\varepsilon_R)_{ip}$	$(k_L)_{ip}$	$\Theta = (T_e/T_i)_{ip}$	$\Gamma_{l(+)\text{min}}$
FAL F(1) _p	650	0.1	0.21	16	$2.56 \cdot 10^{-5}$
FAL F(1) _p	650	0.03	0.11	19.8	$2.09 \cdot 10^{-7}$
FAL F(2) _p	700	0.03	0.11	19.7	$1.48 \cdot 10^{-7}$
FAL E(2) _p	1375	0.1	0.21	15.9	$4.37 \cdot 10^{-7}$
FAL E(2) _p	1375	0.08	0.21	13.3	$1.5 \cdot 10^{-5}$
FAL E(2) _p	1375	0.07	0.21	16.1	$6.2 \cdot 10^{-5}$
FAL E(2) _p	1375	0.05	0.11	16.9	$7.36 \cdot 10^{-9}$
FAL E(2) _p	1375	0.04	0.11	17.8	$1.75 \cdot 10^{-7}$
FAL E (2) _p	1375	0.03	0.11	20	$3.47 \cdot 10^{-8}$
FAL E (1) _p	1380	0.029	0.11	19.7	$1.94 \cdot 10^{-7}$

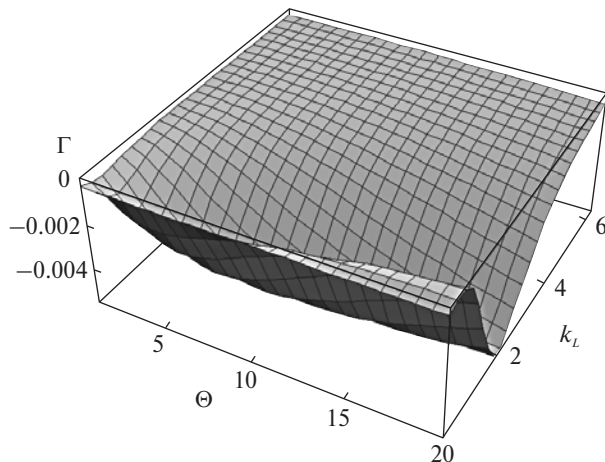


Рис. 1. Относительный (приведенный) инкремент развития ионно-звуковой неустойчивости для модели FAL E(2)_p при $(\epsilon_R)_{гр} = 0.10$; $\sigma_{кл} = 1$; $\Theta_{гр} = 15$ и $(k_L)_{гр} = 0.11$

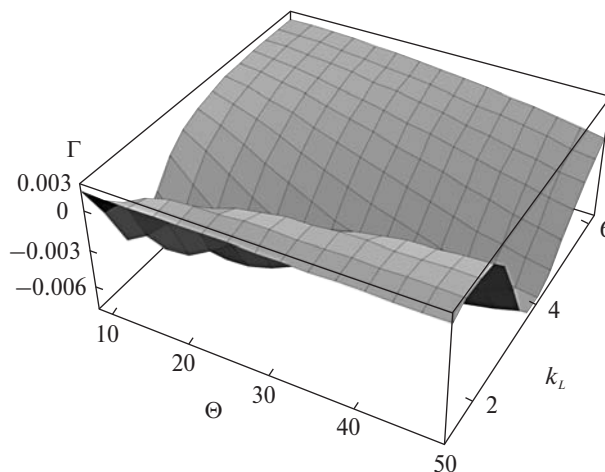


Рис. 2. Относительный инкремент развития ионно-звуковой неустойчивости для модели MAVN F1 при $(\epsilon_R)_{гр} = 0.08$; $\sigma_{эф} = 1$; $\Theta_{гр} = 16$ и $(k_L)_{гр} = 0.21$. Первое положительное значение инкремента в верхнем полупространстве $\Gamma_{l(+)} = 2.88 \cdot 10^{-6}$. Развитие ионно-звуковой неустойчивости происходит на фоне насыщенной бернштейновской турбулентности

ность невозможно. Вид поверхности приведенного инкремента $\Gamma_{l(+)} = \Gamma(k_L, \Theta)$ для данного случая приведен на рис. 1.

Как же изменяется процесс развития неустойчивости при переходе к исследованию ее развития на фоне насыщенной бернштейновской турбулентности? Как видно из данных, приве-

денных в табл. 3, процесс остается высокочастотным, и граничные значения величин k_L и Θ изменяются незначительно. При этом весьма значительно изменяются граничные значения величин ϵ_R (порог возбуждения по амплитуде электрического поля), и данная неустойчивость появляется на предельно низких высотах, вблизи нижней границы выбранного интервала, т. е. там, где ее раньше не было. Граничные значения основных характеристик развития неустойчивости для этого случая приведены в табл. 3. Хорошо видно, что уменьшение порога возбуждения неустойчивости возможно лишь при повышении степени неизотермичности плазмы. При этом топология поверхности приведенного инкремента $\Gamma_{l(+)} = \Gamma(k_L, \Theta)$ остается той же, а внешний вид изменяется незначительно, что отчетливо видно на рис. 2.

Весьма интересным, на наш взгляд, результатом является то, что полученный интервал изменения граничных значений степени неизотермичности плазмы Θ

$$13.3 \leq \Theta_{гр} \leq 20$$

существенно перекрывается с интервалом

$$8.1 \leq \Theta \leq 16,$$

полученным в работе [5] и соответствующим области тепловой неустойчивости токового слоя.

Суммируя все полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Развитие ионно-звуковой неустойчивости в предвспышечной плазме с кулоновской проводимостью возможно лишь вблизи верхней границы выбранного интервала высот, где различия между моделями солнечной атмосферы MAVN и VAL с одной стороны, и моделью FAL — с другой стороны, являются максимальными. При этом возбуждаемая неустойчивость является мелкомасштабной, поскольку граничная длина волны возмущения изменяется в интервале от 30 до 60 дебаевских радиусов. Пороговые значения субдрейсеровского электрического поля $(\epsilon_R)_{гр} \approx 0.1$ существенно ниже обычных пороговых значений токовых неустойчивостей, и прежде всего бунемановской, однако с точки зрения используемой концепции исследований находятся на пределе используемых приближений. Граничные значения параметра Θ , т. е.

степени неизотермичности плазмы, таковы, что достичь их с помощью обычного джоулева нагрева представляется маловероятным. При этом с формальной точки зрения процесс зарождения и развития ионно-звуковой неустойчивости является высокочастотным, т. е. может быть надежно идентифицирован именно как волновой процесс, а наличие разделяющей линии нулевого инкремента свидетельствует о возможности генерации незатухающих ионно-звуковых волн малой амплитуды.

При переходе от предвспышечной плазмы с кулоновской проводимостью к плазме с насыщенной бернштейновской турбулентностью картина развития неустойчивости во многом остается практически без изменений. Основных отличий всего два, но оба они достаточно существенные. Во-первых, в данном случае неустойчивость может возникнуть и развиваться не только на верхней, но и на нижней границе исследуемого интервала высот. Во-вторых, при переходе к плазме с насыщенной бернштейновской турбулентностью порог возбуждения неустойчивости по амплитуде субдрейсеровского поля может уменьшиться почти в четыре раза. Это важно с точки зрения увеличения толщины предвспышечного токового слоя, т. е. увеличения его «энергеместимости». Однако это возможно только при условии увеличения степени неизотермичности плазмы. Таким образом, вопрос о дополнительных источниках нагрева плазмы остается. Возможно, что для его решения можно использовать, хотя бы на качественном уровне, соображения, высказанные в свое время авторами работ [4, 5]. По их мнению, в данном случае необходим учет диссипативных эффектов, связанных с наличием в предвспышечном слое продольной (по отношению к протекающему в нем току) составляющей магнитного поля. Она может «накапливаться» при сжатии плазмы внутри слоя [5]. Это может привести к появлению электрического тока, циркулирующего вокруг слоя в его поперечном сечении. В условиях конечной проводимости, т. е. при нарушении условия «вмороженности», этот дополнительный ток диссипирует и создает дополнительный джоулев нагрев в слое, и его окрестности. Однако этот на-

грев осуществляется за счет аннигиляции главных (т. е. пересоединяющихся) составляющих, а не за счет «стенерированного» сжатием плазмы продольного поля. Для обычных классических ВТТС, где, как правило, сжатие плазмы невелико, этот эффект мал, но он может быть важен для холодных и плотных токовых слоев в предвспышечном состоянии.

То, что граничные значения степени неизотермичности плазмы, необходимые для появления ионно-звуковой неустойчивости, попадают частично в область неустойчивости тепловой, может оказаться важным моментом в формировании существенно трехмерной структуры токового слоя перед вспышкой. А это, в свою очередь, может стать одним из основных пунктов при построении нестационарных моделей пересоединения.

1. Александров А. Ф., Боданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. — М.: Высш. шк., 1989. — 424 с.
2. Резникова В. Э., Мельников В. Ф., Горбиков С. П., Шибасаки К. Динамика распределения радиояркости вдоль вспышечной петли // Сб. тез. конф. «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 5–8 февраля 2008 г. — М.: ИКИ РАН, 2008. — С. 17.
3. Резникова В. Э., Мельников В. Ф., Шибасаки К. Эволюция распределения радиояркости вдоль протяженных вспышечных петель // Тез. докл. науч. конф. памяти М. Т. Тереховой (Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.). — Нижний Новгород: ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет», УНЦ «Фундаментальная радиофизика», 2007. — С. 17–18.
4. Сомов Б. В. Солнечные вспышки // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия. — 1987. — 34. — С. 78–135.
5. Сомов Б. В., Титов В. С., Вернетта А. И. Магнитное пересоединение в солнечных вспышках // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия. — 1987. — 34. — С. 136–237.
6. Aschwanden M. I. An evaluation of coronal heating model for active regions based on Yohkoh, SOHO and TRACE observations // *Astrophys. J.* — 2001. — 560, N 2. — P. 1035–1043.
7. Fontenla J. M., Avrett E. H., Loeser R. Energy balance in solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion // *Astrophys. J.* — 1993. — 406, N 1. — P. 319–345.
8. Foukal P., Hinata S. Electric fields in the solar atmosphere: a review // *Solar Phys.* — 1991. — 132, N 1. — P. 307–330.

9. Heyvaerts J., Priest E., Rust D. An emerging flux model for the solar flare phenomenon // *Astrophys. J.* — 1977. — **216**, N 1. — P. 213–221.
10. Kryshchal A. N. Bernstein-wave instability in a collisional plasma with a quasistatic electric field // *J. Plasma Phys.* — 1998. — **60**, Part 3. — P. 469–484.
11. Kryshchal A. N., Gerasimenko S. V., Voitsekhovska A. D. «Oblique» Bernstein modes in solar preflare plasma: generation of second harmonics // *Adv. Space Res.* — 2012. — **5**, N 4. — P. 791–796.
12. Kryshchal A. N., Kucherenko V. P. Ion-acoustic instability caused by large-scale electric field in solar active regions // *Solar Phys.* — 1996. — **165**. — P. 139–153.
13. Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.* — 1980. — **242**, N 1. — P. 336–351.
14. Melnikov V. F., Shibasaki K., Reznikova V. E. Loop-Top Nonthermal Microwave Source in Extended Solar Flaring Loops // *Astrophys. J.* — 2002. — **580**. — P. L185–L188.
15. Miller I. A., Cargil P. I., Emslie A. G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**, N A7. — P. 14631–14659.
16. Pines D., Schrieffer J. R. Collective behavior in solid-state plasmas // *Phys. Rev.* — 1961. — **124**, N 5. — P. 1387–1400.
17. Solanki S. K. Small-scale solar magnetic fields: an overview // *Space Sci. Revs.* — 1993. — **63**. — P. 1–183.
18. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of solar chromosphere. III. Models EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1981. — **45**. — P. 635–725.

Надійшла до редакції 06.02.12

A. N. Kryshchal, S. V. Gerasimenko, A. D. Voitsekhovska

TO THE PROBLEM OF POSSIBILITY OF APPEARANCE OF PREFLARE CURRENT SHEETS IN THE CHROMOSPHERE OF ACTIVE REGION

Conditions of the appearance and development of ion-acoustic instability in preflare plasma of a loop structure in solar active region have been investigated. The investigations were conducted in the framework of a semiempirical FAL (Fontenla-Avrett-Loeser) model of solar atmosphere. Subdreicer electric field together with parallel to it magnetic «kilogauss» field are supposed to be present in the region of current loop near its foot-point. It is shown that small-scale ion-acoustic instability with low threshold of excitation in the units of amplitude of subdreicer field can arise in investigated region before the phase of «pre-heating». It has been demonstrated that in the framework of the concept used, reducing of the threshold of excitation of instability is possible only when the degree of non-isothermality of plasma increases.

Т. Г. Смелая

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

ОЦЕНКА ПОТОКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «Січ-2»

Розглянуто питання, пов'язані із практичним застосуванням аеродинамічної аналогії для розрахунків потоків техногенних часток на навколосезних орбітах. Коротко проаналізовано найвідоміші моделі просторового розподілу космічного сміття навколо Землі. Наведено схему розрахунків потоків сміття на поверхню космічного апарата на базі програмного забезпечення, розробленого раніше для аеродинамічних розрахунків. Представлено результати розрахунків потоків техногенних часток на космічний апарат «Січ-2».

Космический мусор (КМ) (space debris) давно стал одним из важных факторов воздействия на движущийся КА в околоземном космическом пространстве, а иногда и угрозой его активного существования. В связи с этим прогнозирование вероятности сохранения КА своих функциональных возможностей при движении в среде КМ становится все более актуальной задачей. Оценка вероятности столкновения КА с достаточно крупными частицами КМ, способными существенно повредить обшивку КА или элементы его бортовой аппаратуры, на этапе проектирования позволяют разработать необходимые меры защиты и продлить время жизни КА.

Для решения рассматриваемой задачи необходима модель КМ, содержащая сведения о распределении его частиц в пространстве и их физических параметрах. На сегодняшний день существует несколько таких моделей, из которых наиболее популярны модель Европейского космического агентства MASTER [8], модель NASA ORDEM2000 [<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov>], модель SDPA, разработанная в России [7]. На базе модели SDPA-E выпущен ГОСТ-25645.167.2005 «Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве» [4].

Все эти модели дают характеристики потока частиц мусора в зависимости от их размера либо для заданной подспутниковой точки по её высоте и географическим координатам, либо вдоль орбиты КА по её высоте и наклонению. Эти сведения основываются на огромном количестве обобщенных эмпирических данных, полученных при помощи наземных наблюдений в обсерваториях, а также на космических станциях. Границы применения моделей можно оценить по приведенной таблице. Более подробное описание особенностей приведенных моделей распределения потоков частиц КМ приведено в [4, 6–8].

Данные о параметрах КМ, получаемые при помощи разных моделей, часто заметно отличаются [6, 9]. Причиной этого является в первую очередь недостаток, а также неоднородность экспериментальных данных. Кроме этого, возможности наземного слежения за техногенными космическими объектами ограничиваются узкими диапазонами размеров: для низких орбит — не меньше 10–30 см, а для геостационарных орбит (ГСО) — не меньше 75 см. В дополнение к этому измерительная информация может быть получена только на отдельных участках многомерной области «высота и широта точки — размеры КО — время». Поэтому для восполнения

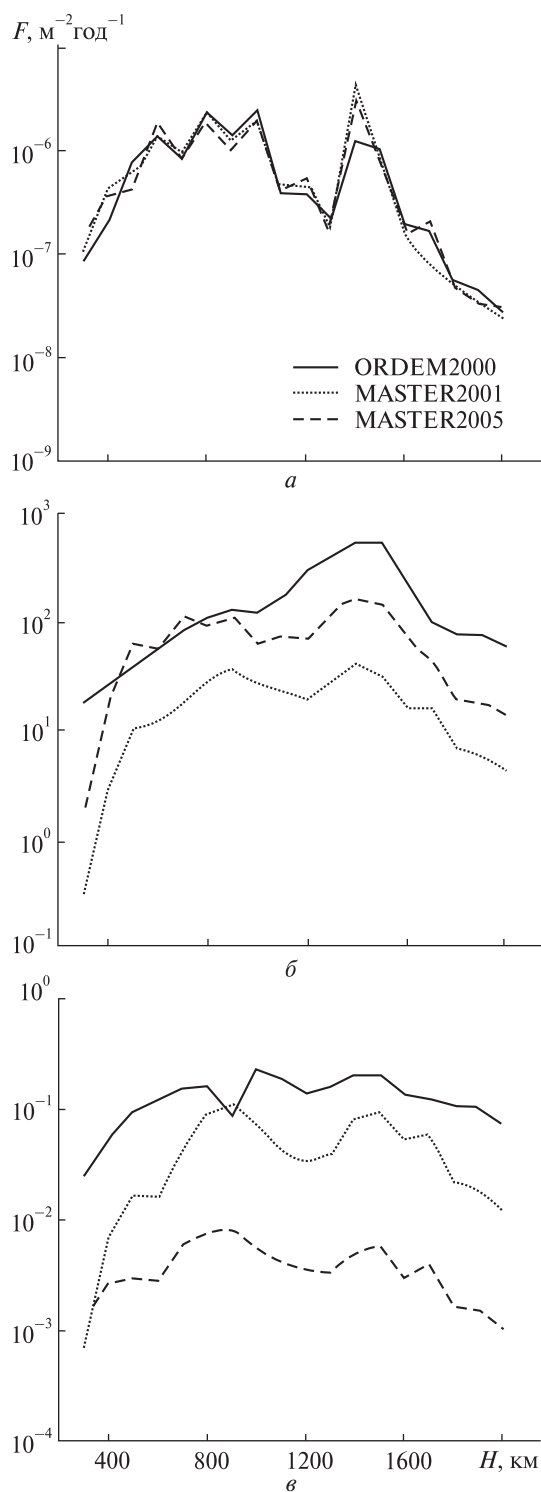


Рис. 1. Зависимость величины потока космического мусора от высоты для разных моделей (наклонение орбиты $i = 100^\circ$): *a* — размер частиц более 1 м, *б* — размер частиц более 0.1 мм, *в* — размер частиц более 1 мм

недостающих данных привлекается дополнительная (априорная) информация.

Наилучшее совпадение моделей наблюдается для частиц с размерами более 1 м (рис. 1, *a*). Наибольшее отличие имеет место для объектов размером от 100 нм до 1 см (рис. 1, *б, в*), а данные о величине потока мусора для таких частиц в зависимости от скорости столкновения на некоторых орбитах могут отличаться в десятки раз [9]. Например, натурные эксперименты показали, что солнечные панели пробиваются частицами размером 1–1.5 мм, движущимися со скоростью 5–7 км/с; а корпус КА — частицами размером 1 мм и скоростью 5 км/с [11]. Это значит, что наибольший интерес для расчетов и оценки «пробоя — не пробоя», представляет именно тот диапазон размеров КМ, который, к сожалению, имеет наименьшую достоверность данных. Но, несмотря на все недостатки моделей, они все же позволяют оценивать воздействие на КА потоков частиц КМ, а значит и время жизни спутника, деградацию его частей, а также бортовой аппаратуры.

Физическая аналогия между движением в облаке КМ и процессами торможения КА в верхней атмосфере Земли [7] позволяет применить методы и алгоритмы, отработанные для молекулярного переноса вещества, к задаче воздействия потоков КМ на КА. При этом пространственное распределение частиц верхней атмосферы Земли заменяется на аналогичные параметры модели КМ. Модель рассматривает мусор как сумму нескольких сред, состоящих из частиц определенного поперечного размера, попадающих в один из заданных диапазонов. Задача решается для каждого такого диапазона независимо друг от друга.

В настоящей работе для получения количественных характеристик потока КМ вдоль траектории полета КА использован демонстрационный вариант модели пространственно-временного распределения техногенного вещества ORDEM2000. Идея методики расчета потоков КМ на выпуклые тела простой геометрической формы, а также вероятностных характеристик позаимствована из работы А. И. Назаренко [7].

Расчетные алгоритмы и программы строятся на основе алгоритмического и программного обес-

печения, разработанного в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины для решения задач аэродинамики разреженных газов [3]. Главным их достоинством является применимость к расчету потоков на КА сложной формы с учетом взаимного затенения отдельных элементов конструкции.

Вместо скорости набегающего потока верхней атмосферы вводится понятие относительной скорости V_{rel} встречи КА с фрагментами КМ (рис. 2). Здесь α — азимутальный угол сближения частицы космического мусора с аппаратом в относительном движении; S — точка пересечения орбит КА и КМ; θ — угол пересечения орбит КА и КМ; $V_{КА}$ — скорость КА; $V_{ч}$ — скорость отдельной частицы КМ. Аналогичная задача была успешно решена при аэрогазодинамическом сопровождении международного проекта «Венера-Галлей», когда необходимо было решать задачу высокоскоростного взаимодействия (~80 км/с) пылевой составляющей кометной атмосферы с элементами конструкции КА «Вега» [10].

Частицы КМ фактически являются спутниками Земли. Малость радиальной составляющей вектора их скорости в геоцентрической системе координат (<0.1 км/с) по сравнению с горизонтальной составляющей (от 6 до 11 км/с) дает нам право пренебречь ею.

В отличие от задачи свободномолекулярного обтекания КА одномерным потоком газа, «набегающий» поток КМ двумерный. Вследствие этого при расчете силового воздействия частиц КМ на поверхность КА следует учитывать все возможные направления подлета техногенных



Рис. 2. Схема взаимного движения КА и отдельной частицы КМ

частиц. Для этого так называемая горизонтальная плоскость, в которой движутся частицы КМ, разбивается на равные сектора с центром, совпадающим с центром КА, и задача решается для каждого сектора отдельно. Внутри сектора вычисляется величина относительной скорости сближения частиц КМ и КА. Её направление определяется азимутальным углом α .

Внешняя поверхность КА разбивается на базовые элементы, каждый из которых, в свою очередь, разбивается на элементарные площадки dS . Проверяется экранирование элементарной площадки элементами конструкции КА в направлении относительной скорости сближения внутри сектора. Введем угол β между внешней нормалью к элементарной площадке и направлением относительной скорости набегающего потока V_{rel} . В случае отсутствия экранирования вычисляется $\cos\beta$. Суммированию подлежат только те элементарные площадки, для которых $\cos\beta > 0$. Для каждой элементарной площадки

Границы применимости разных моделей распределения частиц в пространстве

Модели	Размеры частиц, нм	Высота орбиты, км	Период времени, год	Формы орбит	Природа учтенных объектов
ORDEM2000	>10	200—2000	1991—2030	Круговые и эллиптические	Техногенные
MASTER (версия 2001)	>1	186—38786	1958—2050	Круговые	Техногенные и метеороиды
MASTER (версия 2005)	>1	186—36786	1957—2055	Круговые	Техногенные и метеороиды
SDPA	>1000	200—2000, 35700±400	2000—2025	Круговые и эллиптические	Техногенные

выполняются расчеты с использованием требуемых физических параметров. Суммируя полученные значения искомых характеристик для всех площадок, получим полный поток частиц КМ на поверхность КА внутри i -го сектора:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{d\alpha}}{dt} &= dQ(d\alpha) = \\ &= \rho(t) \int_S d\alpha \cdot p(t, \alpha) \cdot V_{rel}(\alpha) \cos \beta(\alpha, S) dS = \\ &= \rho(t) d\alpha p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) S(\alpha), \end{aligned}$$

где $S(\alpha) = \int_S \cos \beta(\alpha, S) dS$, N — число частиц КМ в потоке; $\rho(t)$ — объемная плотность частиц, $1/\text{км}^3$; $p(t, \alpha)$ — плотность распределения направлений потока частиц в данной точке пространства, %; t — временной параметр, с; dS — площадь элементарной площадки, м^2 ; $dQ(d\alpha)$ — поток частиц на поверхность КА для азимутального сектора $d\alpha$, $S(\alpha)$ — эффективная площадь КА в направлении потока КМ.

Полный поток КМ через всю его поверхность КА можно получить, суммируя поток по всем направлениям подлета частиц КМ к аппарату:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= Q = \int_{\alpha} dQ(d\alpha) = \\ &= \rho(t) \int_{\alpha} \int_S \cos \beta(\alpha) p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha dS. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно [4, 5] суммарный поток частиц КМ на поверхность КА, как и силу лобового сопротивления в аэродинамике, можно представить в виде

$$\frac{dN}{dt} = Q = C_N S_{\text{хар}} \rho(t) \bar{V}_{rel}(t, \alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где $S_{\text{хар}}$ — значение характерной площади, м^2 ; $\bar{V}_{rel}$ — средняя относительная скорость столкновения КМ с космическим аппаратом, км/с ; C_N — некий коэффициент формы, который определяется геометрией и ориентацией КА в потоке частиц КМ и в некотором смысле является аналогом коэффициента лобового сопротивления.

Значение средней относительной скорости столкновения, являющейся аналогом средней относительной скорости движения КА в воздухе в аэродинамике, определяется по формуле

$$\bar{V}_{rel}(t) = \int_{\alpha} p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha, \quad (3)$$

а коэффициент C_N , в соответствии с (1)–(3), представим в виде

$$\begin{aligned} C_N &= \frac{Q}{S_{\text{хар}} \rho \bar{V}_{rel}} = \\ &= \frac{\int_{\alpha} \int_S \cos \beta(\alpha) p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha dS}{S_{\text{хар}} \int_{\alpha} p(t, \alpha) V_{rel}(\alpha) d\alpha}. \end{aligned}$$

Среднее значение числа столкновений частиц КМ с поверхностью КА определяется из соотношения

$$N = C_N S_{\text{хар}} \bar{\rho} \bar{V}_{rel} t,$$

где $\bar{\rho}$ — усреднённое по траектории значение объемной плотности.

Коэффициент формы C_N — безразмерная величина. В частном случае для КА сферической формы (характерная площадь $S = \pi R^2$) значение C_N равно 1.

В работе [1] приведены результаты расчетов C_N для тел простой формы в зависимости от размера техногенных частиц, высоты орбиты и её наклона, проведенные для разработанного расчетного алгоритма на основании данных модели ORDEM2000. Они показали хорошее соответствие результатам [7]. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что из всех определяющих параметров задачи наиболее существенным является распределение направлений потока частиц мусора, подлетающих к КА. Это распределение имеет сложный характер и зависит как от географической широты и долготы, так и от высоты над уровнем Земли. В работе [4] приведены таблицы и графики, иллюстрирующие распределение направлений потока в зависимости от параметров орбиты (высоты и наклона). В работе [1] представлено также семейство кривых значений C_N в зависимости от диаметра частиц мусора для КА сложной геометрической формы.

В настоящей работе внимание сосредоточено на расчетах потоков КМ на КА системы «Січ-2» (МС-2-8, «Мікросат»), движущиеся по солнечно-синхронным орбитам (наклонение орбиты $i = 98^\circ$) высотой $H = 700$ км. Рассматриваемый аппарат состоит из корпуса и четырех солнечных батарей (рис. 2), а его внешняя поверхность аппроксимируется 30 базовыми элементами [2].

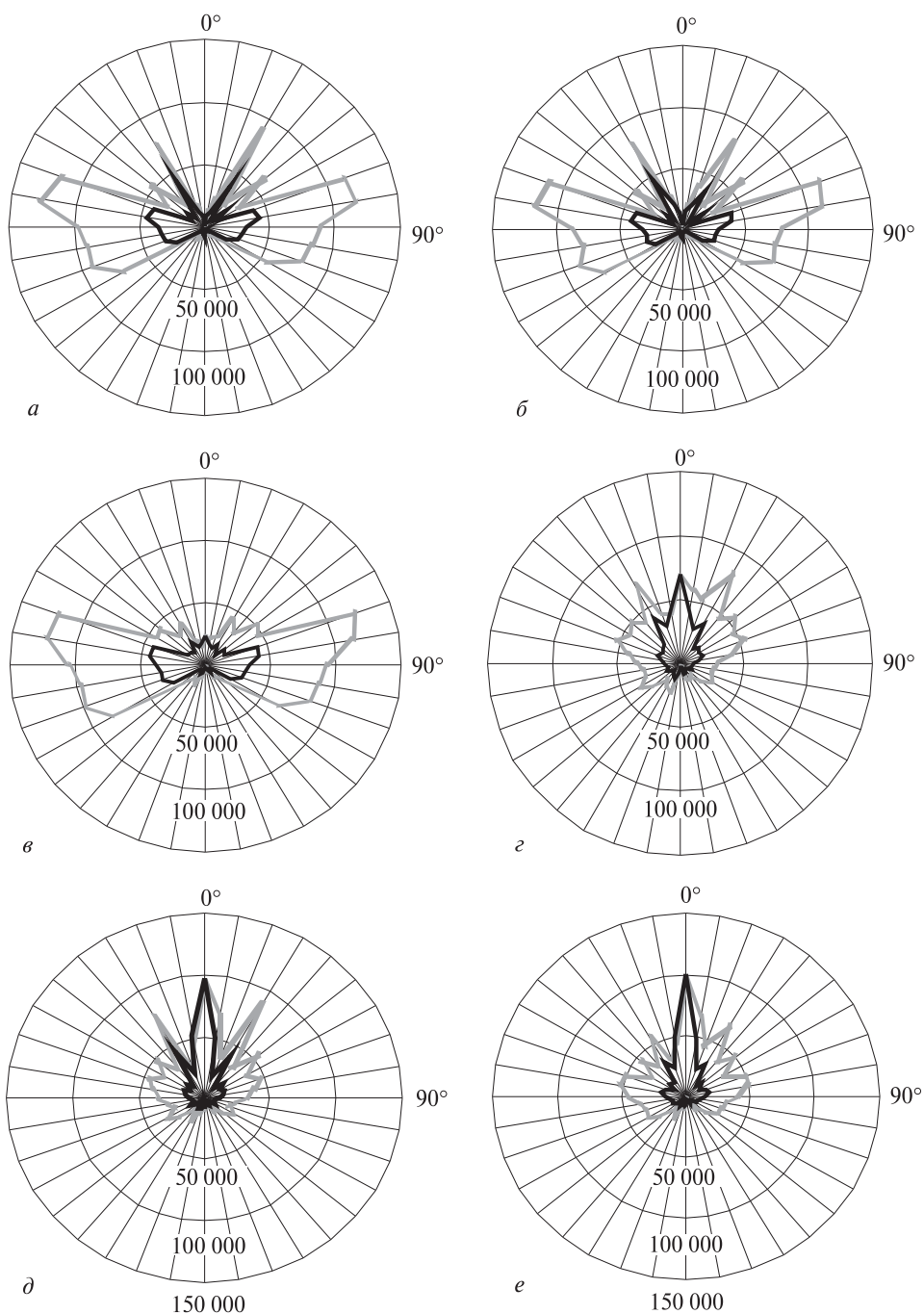


Рис. 3. Суммарные потоки КМ на поверхность «Січ-2» за один орбитальный период (серая линия — максимальный поток, черная — минимальный поток): *а* — частицы размером более 10 нм, *б* — частицы размером более 100 нм, *в* — частицы размером более 1 мкм, *г* — частицы размером более 1 см, *д* — частицы размером более 10 см, *е* — частицы размером более 1 м

На рис. 3 приведены круговые диаграммы суммарных значений потока КМ на этот КА вдоль одного витка на орбите для шести диапазонов размеров частиц. Расчеты сделаны для случая минимальной и максимальной эффективной площади КА. В первом случае КА ориентирован таким образом, что горизонтальная плоскость, в которой движется поток КМ, параллельна плоскости солнечных батарей, и частицы попадают фактически только на боковые стороны корпуса. Во втором случае направление движения КА перпендикулярно к рабочей плоскости батарей, и техногенные частицы, имеющие самую большую величину относительной скорости, попадают на солнечные батареи под прямым углом. Видно, что потоки КМ для разных диапазонов частиц падают на его поверхность практически симметрично относительно оси движения, но характер их распределения по азимутальному углу α различен. Для частиц не более 1 мм максимальные потоки падают под углом $90 \pm 20^\circ$, имея пики около 30° ; для остальных размеров частиц основной пик появляется при $\alpha = 0 \pm 30^\circ$ и постепенно увеличивается для случая с не работающими солнечными батареями (черная линия), а для максимального потока (серая линия) пики появляются только для частиц размером более 10 см. Графики позволяют определить наиболее вероятные направления движения потоков техногенных частиц заданных размеров и скоростей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов расчетов потоков КМ на поверхность КА позволили установить:

- решающее влияние на результаты данных о круговом распределении техногенного мусора в горизонтальной плоскости;
- существенное влияние ориентации КА на величины потоков и характер их распределения.

Полученное программное обеспечение может использоваться для определения наиболее выгодной ориентации КА (с точки зрения попадания на его поверхность минимальных потоков КМ), а также определения наиболее безопасных зон расположения уязвимых элементов КА.

1. Абрамовская М. Г., Басс В. П., Данакин Ю. В., Смелая Т. Г. Применение методов динамики разреженного газа для определения потоков техногенных час-

тиц в верхней атмосфере Земли на поверхность космических аппаратов // Техническая механика. — 2010. — № 4. — С. 44—56.

2. Абрамовская М. Г., Басс В. П., Перминов В. Д. Пакет прикладных программ «Высота-2». Описание применения. — М.: ОФАП МАП, 1990. — 175 с.
3. Басс В. П. Молекулярная газовая динамика и ее приложения в ракетно-космической технике. — Киев: Наук. думка, 2008. — 272 с.
4. ГОСТ Р 25645.167—2005. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве. — М.: Стандартинформ, 2005. — 41 с.
5. Иванов В. Л., Меньшиков В. А., Пчелинцев Л. А., Лебедев В. В. Космический мусор. Проблема и пути её решения. — М.: Патриот, 1996. — Т. 1. — 360 с.
6. Модель космоса: В 2 т. — М.: КДУ, 2007. — Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — 1144 с.
7. Назаренко А. И. Аэродинамическая аналогия взаимодействия поверхности КА разной формы с космическим мусором // Космич. исслед. — 1996. — **34**, № 3. — С. 317—324.
8. Bendisch J., Bunte K., Klinkrad H., et al. The MASTER-2001 model // Adv. Space Res. — 2004. — **34**, N 5. — P. 959—968.
9. Fukushige Sh., Akahoshi Y., Kitazawa Y., et al. Comparison of Debris Environment Models; ORDEM2000, MASTER2001 and MASTER2005 // IHI Engineering Review. — 2007. — **40**, N 1. — P. 31—41.
10. Rijov Yu. A., Bass V. P., Kovtunenkov V. M. Aerodynamic problems of space probes in comet atmosphere // Rarefied Gas Dynamic: 13 International Symposium on Rarefied Gas Dynamic. — New York, London: Plenum Press, 1982. — Vol. 1. — P. 503—511.
11. Schaefer F. K., Schneider E., Lambert M. Review of ballistic limit equations for composite structure walls of satellites // Proc. of the 5th Internat. Symp. on Environmental Testing for Space Programmes / Ed. by K. Fletcher. — Noordwijk, The Netherlands, 2004. — P. 431—444. — (ESA SP-558, June 2004).

Надійшла до редакції 01.10.11

T. G. Smelaya

AN ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC PARTICLE FLUXES ON THE SICH-2 SPACE VEHICLE SURFACE

We consider some questions related to the practical application of aerodynamic analogy to the calculations of anthropogenic particle fluxes in near-Earth orbits. Well-known models for spatio-temporal distribution of space debris around the Earth are briefly analyzed. A calculation scheme for space debris fluxes on the surface of a space vehicle with the use of the existing software for aerodynamic calculations is given. Our results of calculations for anthropogenic particle fluxes on the surface of the Sich-2 system space vehicle are presented.

УДК 523.68; 523.683; 520.8; 52.126; 52.128; 52.13; 52.14

П. М. Козак, О. О. Рожило, Ю. Г. Тарануха, В. Г. Кручиненко

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

ПОШУК РАДІАНТІВ МЕТЕОРНИХ ПОТОКІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ БАЗИСНИХ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 2001 ТА 2003 РОКІВ

Приводяться результати пошуку нових та підтвердження відомих слабких метеорних потоків на основі оригінальних двосторонніх телевізійних спостережень метеорів. Приводяться результати кінематичної обробки вересневих спостережень 2001 р. Спостереження у вересні 2003 р. були опубліковані раніше. Підтвердження відомих метеорних мініпотоків провадиться незалежно для різних років. Пошук нових мініпотоків реалізується лише для 2003 р., однак результати спостережень 2001 р. використовуються для уточнення параметрів нових потоків. Підтверджено сім відомих мініпотоків, з них два за обома роками спостережень. Виділено чотирнадцять компактних груп, які можуть бути новими мініпотоків. Два з них ототожнено з відовими потоками, але пропонується уточнення кінематичних параметрів цих потоків.

ВСТУП

Класифікація метеорних потоків, встановлення генетичного зв'язку з тілами, що їх породжують, пошук нових слабких метеорних потоків має значення не лише для космогонії Сонячної системи, але й має прикладний аспект, пов'язаний з безпекою космічних польотів. Раптове підвищення активності метеорного потоку може тимчасово збільшити на порядки імовірність зіткнення космічного апарата з метеороїдом, а відтак вивести з ладу наукову апаратуру на супутнику, пошкодити систему життєзабезпечення на пілотованій космічній станції, чи призвести до повної розгерметизації космічного апарата [4].

Передбачення сплеску активності потужних метеорних потоків завдяки дослідженням еволюції орбіт прабатьківських комет (наприклад, передбачення піку активності Леонід в 2001—2002 рр. [9] або Драконід в 2011 р. [10, 14]) дає можливість вжити запобіжні заходи на навколоземних космічних апаратах, наприклад тимчасово закрити орбітальні телескопи. Передбачити підвищення активності для всіх відомих метеорних потоків неможливо через недостатні

знання еволюції орбіт прабатьківських тіл. А для більшості метеорних потоків прабатьківські тіла взагалі невідомі. Крім того, завжди залишається імовірність відкриття нового метеорного потоку, який може давати сплески активності у певні роки. Відтак задача дослідження тонкої структури метеорних роїв та пошуку нових метеорних потоків залишається актуальною і зараз.

У робочому списку сучасної метеорної бази даних Міжнародного астрономічного союзу (MDC IAU) [6, 12] нараховується 366 метеорних потоків, серед яких 64 вважаються надійно встановленими. Однак роботу з підтвердження зареєстрованих або відкриття нових метеорних потоків не завершено. Встановлення належності певної групи метеорів зі схожими кінематичними параметрами до деякого метеорного потоку є фактом ненадійним через структурованість метеорних роїв та еволюцію геліоцентричних орбіт метеорів. Так само, як через еволюцію параметрів орбіти втрачається зв'язок між метеороїдами і їхніми батьківськими тілами, може бути втрачено належність групи метеороїдів до метеорного потоку. Метеороїди певного потоку повільно дисипують до спорадичного фону, а натомість можуть з'являтися нові складові потоку, якщо прабатьківська комета залишається активною.

Час існування метеорного потоку та його інтенсивність залежить від активності комети та періоду її обертання, що обумовлює частоту її проходження через перигелій, де проходить найінтенсивніший викид метеорних частинок з ядра. Крім того, оскільки спостереження метеорного потоку можливі лише при взаємодії космічних частинок з атмосферою Землі, то при визначенні інтенсивності потоку важливим фактором є і близькість орбіти прабатьківської комети до земної орбіти.

Для прикладу розглянемо елементи орбіти комети 1P/Галлея та метеорних потоків, які вона породжує: Оріоніди та η -Аквариди [5]. Обидва потоки є достатньо активними та належать до найпотужніших метеорних потоків, що перетинають земну орбіту. При рухові кометних частинок до перигелію у жовтні спостерігаються Оріоніди, а у травні, після проходження перигелію, — η -Аквариди. Інтенсивність потоків обумовлена високою активністю комети 1P/Галлея та довгим часом її існування. За деякими оцінками [5] кількість її проходжень через перигелій перевищує 3 000. Однак з розгляду елементів орбіти комети та метеорних потоків [5] видно, що деякі елементи орбіти змінюються набагато більше, аніж інші. Так, нахил та ексцентриситет досить мало змінюються з часом: для комети $i = 162.2^\circ$ та $e = 0.967$, а для потоків Оріонід та η -Акварид $i = 163.9^\circ$, $e = 0.962$ та $i = 163.9^\circ$, $e = 0.958$ відповідно. Великі ж півосі орбіт та аргументи перигелію змінюються найбільше. Для комети $a = 17.9$ а. о., $\omega = 111.9^\circ$, для потоків Оріонід та η -Акварид $a = 15.0$ а. о., $\omega = 82.5^\circ$ та $a = 13.3$ а. о., $\omega = 95.2^\circ$ відповідно. Даний факт приймемо до уваги при ототожненні окремих метеорів, отриманих із спостережень, з відомими метеорними потоками.

Метеорна база даних MDC IAU з надходженням нових результатів спостережень динамічно змінюється. Так, наприклад, наймасовіші базисні відеоспостереження японських любителів метеорної астрономії за програмою мережі SonotsCo [13] дали результати кінематичної обробки для 19274 метеорів за 2007 р., 19436 метеорів за 2008 р. та 25940 метеорів за 2009 р., тобто загалом 64650 радіантів окремих метеорів [<http://sonotaco.jp/doc/SNM/>]. Лише за 2007—2008 рр.

[13] було відкрито 24 потенційно нових слабких метеорних потоки, з яких 10 уже увійшли у метеорну базу даних [6], а 14 мають бути ще підтверджені. Крім того, за ці два роки не було підтверджено 26 слабких потоків, що вже внесено у базу даних, а відтак постає питання про їхню реальність.

Міжнародна організація любителів метеорної астрономії IMO [<http://www.imo.net>] представила результати аналізу односторонніх спостережень [11] 450 000 за останні 10 років. Було підтверджено дев'ять потужних та 44 слабких метеорних потоки, що входять до MDC IAU, та відкрито, на погляд авторів, 12 нових потоків.

Хоча метеорна база даних регулярно доповнюється результатами нових спостережень, однак слід зауважити, що результати спостережень не розподілені рівномірно протягом року, а сконцентровані у межах активності найбільш інтенсивних метеорних потоків. Тому будь-яка достовірна спостережна інформація про метеори є на сьогодні корисною для ідентифікації відомих та пошуку нових слабких метеорних потоків.

В даній роботі ми приводимо результати такої ідентифікації та пошуку метеорних потоків за результатами базисних телевізійних спостережень в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Спостереження провадилися 21—22 вересня 2001 р. та 19—24 вересня 2003 р. Кінематичні характеристики 80 метеорів 2003 р. приведені в роботі [3]. Результати спостережень 2001 р. коротко приводяться далі.

РЕЗУЛЬТАТИ БАЗИСНИХ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ У 2001 Р.

Спостереження проводилися зі спостережних станцій обсерваторії, розміщених на базисній відстані 54 км одна від одної, з 18 год 21 вересня до 02 год 22 вересня за UTC одночасно з двох пунктів. За 8 год спостережень було зареєстровано 35 метеорів у пункті А (камера направлена в зеніт) і 63 метеори у пункті В (камера направлена за азимутом на пункт А і на висоту, що відповідає перетину оптичних осей на висоті 100 км). Після попереднього опрацювання загальна кіль-

кість базисних метеорів, придатних для обробки, склала 18.

Тип та характеристики телевізійних камер, що використовувалися для спостережень, можна знайти в роботі [3]. Методика обробки та опис відповідного програмного забезпечення можуть бути знайдені в роботах [1–3, 7, 8].

У табл. 1 приведено кінематичні характеристики метеора, необхідні для ідентифікації його з метеорним потоком, та деякі інші параметри: мінімальний час життя метеора τ , мінімальна довжина L метеора, мінімальна висота H_b появи та максимальна висота H_e зникнення, швидкість на нескінченності v_∞ , середня квадратична похибка визначення швидкості σ_v , геоцентрична швидкість метеора v_{RG} , екваторіальні координати геоцентричного радіанта α_{RG} , δ_{RG} , нахил орбіти i , аргумент перигелію ω , довгота висхідного вузла Ω , велика піввісь орбіти a . Для метеорів №№ 1, 6, 11, які не повністю попали у кадр, приведено верхні або нижні оцінки параметрів.

Як видно, метеори № 8 і № 17 гіперболічні. Метеор № 8 має екстремально велику похибку визначення швидкості — понад 30 %. Настільки

велика похибка зумовлена надзвичайною слабкістю метеора (порядку $+7^m$), а відтак і низькою точністю визначення положення голови метеора. Тому і досить велика оцінка висоти його появи 134.8 км/с не є надійною. Інший гіперболічний метеор № 17, попри його дуже велику швидкість та малий блиск, має малу похибку визначення швидкості — порядку 1 км/с.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВІДОМИХ МЕТЕОРНИХ ПОТОКІВ

Для ідентифікації метеорів, що спостерігалися у вересні 2001 та 2003 рр., з відомими метеорними потоками з MDC IAU [6] будемо використовувати елементи кластерного аналізу, аналогічно до [13], де для ототожнення використовувалися чотири параметри: екваторіальні координати геоцентричного радіанта, геоцентричні швидкості та час активності потоку (ці дані наведено в MDC IAU майже для всіх потоків). Однак, зважаючи на те що швидкість за телевізійними спостереженнями визначається не дуже надійно (табл. 1), додатково ми будемо користуватися деякими елементами орбіти. Оскільки велика піввісь та

Таблиця 1. Деякі параметри траєкторії метеорів 2001 р. у атмосфері, геоцентричні радіанти та модулі швидкості

№	Дата, вересень 2001 р.	UTC	τ , с	L , км	H_b , км	H_e , км	v_∞ , км/с	σ_v , км/с	v_{G^*} , км/с	α_{RG^*} , град	δ_{RG^*} , град	a , а.о.	e	i , град	ω , град	Ω , град
1	21	18:28:49	>0.39	>21.5	117.5	<104.9	58.3	0.8	57.26	50.89	57.99	19.2	0.96	108.5	234.8	178.5
2	21	18:50:46	0.34	6.3	106.5	104.8	17.7	2.3	13.84	199.86	30.87	1.4	0.41	14.8	111.4	178.5
3	21	19:30:37	0.26	7.6	102.5	99.9	43.4	2.1	41.96	28.93	8.41	3.7	0.98	7.9	152.7	358.5
4	21	20:26:22	0.46	23.7	111.2	95.8	49.6	0.1	48.38	28.17	68.54	12.2	0.93	85.0	225.2	178.6
5	21	20:37:32	0.54	12.0	103.5	94.2	23.2	0.8	20.41	269.50	54.04	4.2	0.76	30.3	182.2	178.6
6	21	21:57:26	>0.37	>20.8	>107.5	<106.9	61.9	0.2	60.87	86.97	-2.18	1.9	0.49	132.9	14.7	358.6
7	21	21:59:13	0.22	12.2	113.8	108.0	61.5	0.2	60.45	101.75	57.45	5.1	0.81	120.0	157.0	178.6
8	21	22:11:31	0.54	36.2	134.8	100.8	54.8	18.3	53.62	334.17	62.71	-0.6	2.44	67.3	212.8	178.7
9	21	22:49:39	0.26	13.8	110.9	101.4	50.9	1.5	49.71	108.04	73.75	2.8	0.64	94.0	166.0	178.7
10	21	22:52:55	0.50	10.6	87.3	80.4	20.5	0.4	17.21	351.21	7.32	1.8	0.62	5.6	262.3	178.8
11	21	22:56:17	>0.74	>17.1	>94.4	82.7	27.1	0.9	24.73	21.61	1.42	1.1	0.75	8.2	132.9	358.6
12	21	23:19:50	0.18	9.7	109.5	100.3	60.2	0.5	59.17	49.89	46.77	9.1	0.94	121.2	261.1	178.7
13	21	23:34:44	0.50	13.5	102.0	91.6	28.1	0.4	25.76	308.90	62.70	3.3	0.71	40.5	208.9	178.7
14	22	0:28:05	0.22	59.3	111.0	101.8	50.2	2.2	49.00	65.93	38.52	0.8	0.64	159.7	200.5	178.7
15	22	0:34:48	0.14	8.3	110.9	106.3	67.2	3.1	66.23	72.66	37.77	4.8	0.82	152.0	228.9	178.7
16	22	1:28:46	0.54	33.0	132.2	119.4	63.6	0.5	62.65	60.36	26.85	3.2	0.86	167.2	259.5	178.8
17	22	1:32:09	0.10	6.7	109.2	104.0	80.2	1.0	79.43	102.21	33.53	-1.0	1.90	162.8	154.2	178.8
18	22	1:56:29	0.22	12.2	111.0	103.1	60.3	2.5	59.29	96.93	46.38	1.5	0.35	138.5	156.7	178.8

ексцентриситет визначаються безпосередньо за модулем швидкості метеороїда, вони мають також невисоку надійність. Тому будемо використовувати кутові елементи: нахил орбіти та аргумент перигелію. Довготу висхідного вузла будемо використовувати лише для перевірки того факту, що вузол метеороїда залишається аналогічним до вузла потоку, а не зміщеним на 180° . Даний фактор не буде визначальним при малих нахилах орбіт, де висхідний вузол може переходити у низхідний у межах похибок обчислення нахилу орбіти. Оскільки мова йде про слабкі, мало досліджені метеорні рої, час активності потоку залишимо дещо вільним відносно розши-

рення його меж. У будь-якому випадку імовірність коректного визначення належності частинки до певного метеорного потоку залежить від точності обчислення параметрів її орбіти та від заданих меж характеристик потоку. Однак чітких меж розсіяння екваторіальних координат радіанта або швидкості будь-якого потоку немає. При встановленні даних меж можна користуватися розсіянням параметрів за попередніми спостереженнями, якщо такі є. Для слабких метеорних потоків таких спостережень мінімум, а для нових немає взагалі. В роботі [13] використовуються різні межі координат радіанту та швидкості для різних метеорних потоків, однак

Таблиця 2. Час активності метеорних потоків [6] у другій половині вересня, час наших спостережень за 2001 та 2003 рр. та результати підтвердження потоків за даними спостережень

Метеорні потоки / дата	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ауригіди	<																	
β -Груїди																		
Вересневі Линсиди																		
β -Каприкорніди																		
ν -Еріданиди																		
Вересневі ι -Кассіпеїди									1									
ε -Еріданиди																		
Вересневі ε -Персеїди										2/3								
Вересневі γ -Сагіттариди																		
ν -Драконіди									1	1								
Вересневі β -Кассіпеїди																		
Денні π -Леоніди																		
Південні δ -Пісциди									1		1							
ω -Пісциди									?	1								
Вересневі μ -Арієтиди																		
κ -Аквариди										1								
β -Аквариди										?								
Денні κ -Леоніди																		
Вересневі α -Оріоніди																		
Денні δ -Леоніди																		
Північні δ -Пісциди										1	1							
β -Урсиди Майоріс								1										
Денні γ -Віргініди																		
Денні Секстантиди																		
Жовтневі Каприкорніди											1							
Жовтневі δ -Ауригіди																		
σ -Оріоніди											1							
Базисні метеори (шт.), 2001								>>	13	5	<<							
Базисні метеори (шт.), 2003						>>	4	2	11	25	29	9	<<					

не зазначається, за яким правилом вони вибиралися. Наприклад, для більшості потоків просторове розсіювання координат радіанта допускається у межах $3-9^\circ$, розсіювання швидкостей варіює у межах $3-7$ км/с, однак для потоків Гемінід та Персеїд допускаються межі 12 та 20 км/с відповідно. Для зменшення фактора суб'єктивності при такій операції ми скористаємося таким підходом. Виберемо довільно максимальні значення меж параметрів і будемо відкидати метеор як неналежний до даного потоку, якщо хоч один з параметрів перевищує встановлені межі. У протилежному випадку при попаданні у межі одного або кількох метеорів будемо по можливості межі зменшувати до мінімальних. Згідно з роботою [13] і результатами порівняння елементів орбіти комети 1P/Галлея та породжених нею метеорних потоків [5] виберемо їх такими: просторове зміщення геоцентричних радіантів $R_{\max} = 20^\circ$, відмінність модулів швидкостей $|\Delta v_{\max}| = 5$ км/с, нахилів $|\Delta i| = 15^\circ$ та аргументів перигелію $|\Delta \omega| = 15^\circ$. Надалі для порівняння будемо використовувати короткі позначення у вигляді $\{R, |\Delta v|, |\Delta i|, |\Delta \omega|\}$. Наприклад, для максимально можливого відхилення маємо $\{20, 5, 15, 15\}$.

Застосувавши такий підхід окремо до даних спостережень 18 метеорів 2001 р. та 80 метеорів 2003 р., ми отримали результати, приведені в табл. 2. Числа у клітинках означають кількість метеорів, ототожнених з даним потоком, знаки запитання свідчать про ненадійне ототожнення, хоча і в рамках максимальних допусків. Для уникнення плутанини перед результатами 2003 р. поставлено жирну крапку. Клітинки світло-сірого кольору показують час активності метеорного потоку, темно-сірого — дату його максимуму. Назви метеорних потоків в лівій колонці, виділені сірим кольором, показують надійно встановлені метеорні потоки у відповідності до MDC IAU [6]. Кількість метеорів по датах спостережень за різні роки приведена у двох нижніх рядках табл. 2.

Таким чином, за результатами спостережень 2001 р. надійно підтверджено, хоча і малою кількістю метеорів, три метеорних потоки. Вересневі ι -Кассіопеїди підтверджені одним метеором № 4 $\{5, 2, _, _ \}$. Для даного метеорного потоку в

MDC IAU не задані елементи орбіти, і час його активності поки що не встановлений. Таким чином, з одного боку ототожнення метеора з потоком базується лише на порівнянні двох параметрів, що знижує достовірність підтвердження. З іншого боку, даний метеор уточнює час активності даного потоку, який не був достовірно відомим. Надійно підтверджено одним метеором № 5 потік ν -Драконіди: $\{7, 1, 3, 8\}$, та одним метеором № 11 потік Південних δ -Пісцид: $\{5, 2, 2, 2\}$. Потоки Вересневих ε -Персеїд та ω -Пісцид підтверджені менш надійно одиночними метеорами № 15 $\{18, 2, 14, 14\}$ та № 10 $\{19, 5, 5, 12\}$. З чітко встановлених (у відповідності до MDC IAU) п'яти метеорних потоків (див. табл. 2) підтверджено (ненадійно) лише потік Вересневих ε -Персеїд метеором № 15. Чотири ототожнених метеори належать до дванадцяти активних за MDC IAU потоків на час спостережень, та один метеор уточнює час активності потоку.

Щодо результатів спостережень 2003 р., то кількість ототожнень значно вища через більшу статистику: надійно підтверджено сім метеорних потоків дев'ятьма метеорами, один слабо підтверджений метеорний потік (β -Ауригиди), встановлено час дії потоку β -Великої Ведмедиці, та розширено на три доби час активності потоку σ -Оріонід. Загалом результати надійності ототожнення приведені в табл. 3. Крім назви

Таблиця 3. Параметри ототожнення $\{R, |\Delta v|, |\Delta i|, |\Delta \omega|\}$ метеорів 2003 р. з відомими метеорними потоками

Метеорний потік	Дата, вересень 2003 р.	№	Параметри	HQ
Вересневі ε -Персеїди	22	22	$\{8, 2, 6, 10\}$	✓
	22	25	$\{15, 2, 6, 10\}$	
	22	26	$\{8, 2, 4, 7\}$	✓
ν -Драконіди	22	37	$\{2, 2, 3, 6\}$	✓
Південні δ -Пісциди	23	44	$\{9, 3, 1, 10\}$	✓
ω -Пісциди	22	30	$\{15, 2, 3, 6\}$	
κ -Аквариди	22	24	$\{8, 1, 1, 12\}$	✓
β -Ауригиди	22	38	$\{7, 2, 11, 13\}$	
Північні δ -Пісциди	22	52	$\{8, 3, 5, 2\}$	✓
	23	19	$\{7, 3, 3, 2\}$	✓
Жовтневі Каприкорніди	23	43	$\{2, 4, 1, 12\}$	✓
σ -Оріоніди	23	58	$\{5, 4, 4, 12\}$	✓

підтвердженого потоку, приведено дату реєстрації метеора, його порядковий номер у відповідності до [3], параметри ототожнення та умовний ступінь якості ототожнення HQ. Як видно, при оцінці якості найбільше ігнорувалась розбіжність значень аргумента перигелію, у відповідності до вище сказаного та [5].

Очевидно, найбільшу достовірність підтвердження мають потоки, які підтверджено даними спостережень за обидва роки: це у першу чергу ν -Драконіди та Південні δ -Пісциди (які у відповідності до MDC IAU не є надійно встановленими) — вони підтверджені метеорами з гарним збігом параметрів за кожен рік. Дещо гірше, але також за обома роками, підтверджено Вересневі ϵ -Персеїди і ω -Пісциди.

ПОШУК НОВИХ МЕТЕОРНИХ ПОТОКІВ

Проблема пошуку нових метеорних потоків початково вирішувалася нами без уваги про належність ряду метеорів уже до певних потоків — відповідний аналіз робився пізніше. Розв'язувалася дана задача схоже до попередньої задачі ототожнення метеорів з уже відомими потоками, та частково у відповідності з методами кластерного аналізу [13]. Очевидно, точка радіанту потенційно нового метеорного потоку заздалегідь невідома — власне це один з параметрів, які і слід знайти. У роботі [13] використовувався підхід, де вибиралася початково довільна компактна група метеорних радіантів, знаходився її центр як середнє арифметичне в екваторіальних координатах, а далі, при встановлених межах граничних параметрів, проводився ітераційний відсів «зайвих» метеорів з подальшим перевизначенням радіанта потоку. Такий підхід може бути оправданий при великій статистиці спостережних даних (у роботі [13] опрацьовувалося 38710 метеорів). При суттєво меншій кількості даних, як у нашому випадку, є можливість приділити більше уваги дрібнішим підгрупам радіантів окремих метеорів з метою пошуку нових мікропотоків. Хоча в обох випадках очевидно залишається елемент суб'єктивізму, пов'язаний з довільним вибором меж граничних характеристик метеорного потоку.

У нашому випадку скористаємося таким підходом. Початково проведемо оглядовий роз-

поділ на небесній сфері метеорних радіантів за вересень 2003 р. Далі виберемо ряд просторово компактних груп радіантів (аналогічно до [13]). Відсіємо з груп метеори, які суттєво відрізняються хоча б за одним з критичних параметрів.

Далі визначалися середні значення та стандартні відхилення наступних характеристик метеорів, що увійшли до вибірки, як можливі середні параметри метеорного мініпоту: екваторіальних координат геоцентричного радіанта, геоцентричної швидкості v_g , а також п'яти елементів орбіти a , e , i , ω , Ω . Варіаційний підхід до складу вибірки шляхом мінімізації відповідних дисперсій дозволяє перебудовувати вибірку шляхом виключення метеорів з неї, або шляхом розбиття вибірки на декілька незалежних метеорних мікропотоків.

Загалом для метеорів 2003 р. було отримано шість базових вибірок метеорів. Для пояснення практичного використання описаного підходу розглянемо групу № 4 з шести метеорних радіантів, що лежать недалеко від північного полюса світу. На рис. 1 (три зображення проекції небесної сфери на площину, вид ззовні) крім згаданих шести радіантів зображено також компактну близькополюсну групу з чотирьох радіантів та по одному радіанту зліва і знизу, які до розгляду в даний момент не мають стосунку. Крок сітки по прямому сходженню і схиленню складає 10° , суцільна діагональна лінія відповідає нульовому меридіану (початок відліку — зліва внизу). На усіх трьох зображеннях найбільше коло відповідає радіанту потенційного потоку для вибірки з усіх шести метеорів. Для її повного опису та опису інших підвибірок скористаємося табл. 4, де приведено значення параметрів та відповідні стандартні відхилення σ : прямого сходження $\bar{\alpha}_R$ та схилення $\bar{\delta}_R$ геоцентричного радіанта, геоцентричної швидкості $\bar{v}_g$, п'яти елементів орбіти $\bar{a}$, $\bar{e}$, $\bar{i}$, $\bar{\omega}$, $\bar{\Omega}$ та максимального відхилення $\Delta R_{\max}$ радіанта окремого метеора від центра вибірки. (Довгота висхідного вузла відображає положення Землі, і через компактність часового інтервалу спостережень її розсіяння σ_Ω ми не розглядаємо). Величину $\Delta R_{\max}$ і будемо вважати радіусом зони радіації метеорного потоку.

Відповідні характеристики максимальної (базової) вибірки приведені у першому рядку

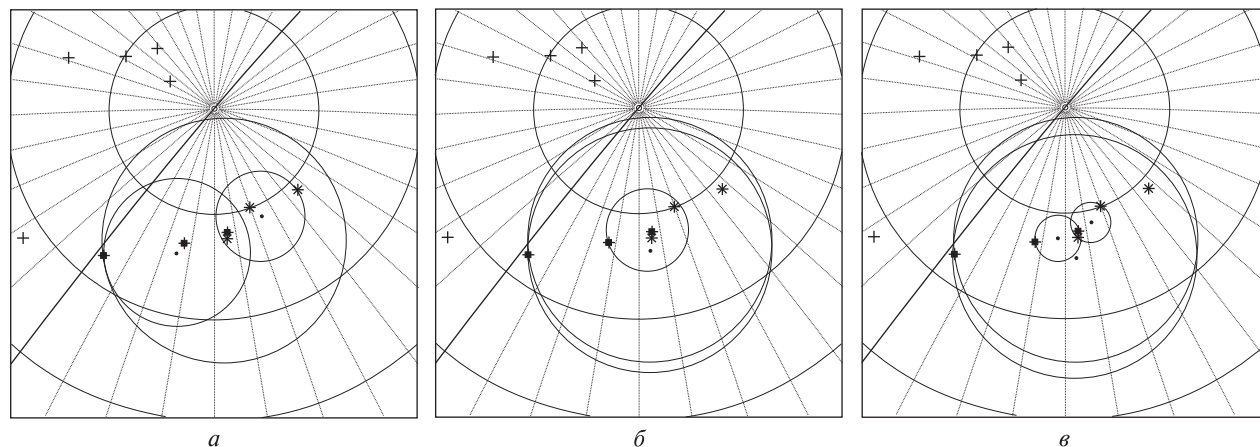


Рис. 1. Проекція небесної сфери на площину (вид ззовні): зображення трьох можливих варіантів розділення початкової вибірки метеорів на менші підвибірки

табл. 4. Як видно, розкид значень швидкостей (3.35 км/с) дещо зavelикий, враховуючи точність наших обчислень (див. табл. 1), зavelикий розкид і нахил орбіт (4.56°). Значення розсіяння аргумента перигелію 11° не є критично великим, зважаючи на дані [5]. Великий півосі та ексцентриситету не будемо надавати великого значення через великі похибки (як наслідок великих похибок модуля швидкості). Однак радіус зони радіації 12° є зavelикий, тому проведемо аналіз вибірки з метою її розбиття на компактніші метеорні підвибірки-мікропотоки.

Результати багатопараметричної варіації приводять до трьох варіантів, зображених на рис. 1. По можливості ми намагалися уникати повного видалення окремого метеора з усіх вибірок при відсутності суттєвого відхилення у параметрах. Також намагалися не робити багато малих підвибірок без критичної необхідності.

Рис. 1, *a* відповідає поділу вибірки на підвибірки за просторовим розміщенням та нахилом орбіти (див. параметри окремих метеорів у роботі [3]). Добре вони поділяються і за аргументом перигелію (табл. 4, варіанти 1-1 і 1-2). Як видно, радіус зони радіації, розсіяння нахилу орбіти та аргумента перигелію суттєво зменшилися, варіації швидкості в одному випадку дещо зменшилися, в іншому — збільшилися.

Якщо провести селекцію за швидкістю, отримаємо дві інші підвибірки (табл. 4, варіанти 2-1 і 2-2 та рис. 1, *b*). Не дивлячись на зменшення радіуса однієї з підвибірок, інша залишилась практично такою ж, як і базова вибірка. Розкид швидкостей зменшився, однак дещо збільшились варіації кутових елементів орбіти.

Якщо спробувати усунути недоліки обох варіантів шляхом розбиття вибірки на кілька підвибірок, в даному випадку максимум на три підви-

Таблиця 4. Параметри базової компактної групи та різних підвибірок з групи № 4 метеорних радіантів

Варіант підвибірки	$\bar{\alpha}_{GR}$	σ_α	$\bar{\delta}_{GR}$	σ_δ	$\bar{v}_G$	σ_v	$\bar{a}$	σ_a	$\bar{e}$	σ_e	$\bar{i}$	σ_i	$\bar{\omega}$	σ_ω	$\bar{\Omega}$	$\Delta R_{\max}$
Базова	44.44	28.34	77.35	2.62	45.77	3.35	4.84	3.29	0.73	0.14	80.27	4.56	202.92	11.11	179.56	11.64
1-1	25.22	21.92	75.85	2.97	44.61	4.03	2.59	0.61	0.62	0.09	76.77	1.01	211.46	1.93	179.55	7.02
1-2	63.67	20.46	78.85	1.24	46.93	2.78	6.35	3.60	0.80	0.13	83.77	3.77	194.39	9.27	179.57	4.25
2-1	44.25	16.17	78.36	1.59	42.86	1.01	2.66	0.44	0.63	0.07	77.97	2.13	206.61	8.03	179.88	3.92
2-2	44.63	41.79	76.34	3.40	48.68	1.28	8.13	2.63	0.87	0.04	82.58	5.62	199.23	14.25	179.24	11.69
3-1	36.65	13.28	77.52	0.91	42.29	0.21	2.59	0.61	0.62	0.09	76.88	1.40	211.12	2.60	179.68	2.18
3-2	44.13	59.08	75.73	4.57	49.41	0.21	3.91	8.59	1.16	0.37	82.10	7.86	198.04	19.94	179.72	11.61
3-3	52.55	9.76	78.80	1.75	45.61	2.26	4.53	2.47	0.74	0.14	81.83	2.40	199.61	2.85	179.28	1.88

Таблиця 5. Нові мініпотіки, виділені у результаті опрацювання усіх шести компактних груп метеорів за 2003 р.

Номер мініпотіку	Кількість метеорів	Номери метеорів	Примітка
1	2	{8, 23}	Новий
2	6	{19, 51, 52, 60, 71, 72}	Північні δ-Пісциди
3	3	{6, 10, 27}	Новий
4	5	{15, 38, 42, 46, 65}	Новий
5	4	{14, 22, 25, 26}	Вересневі ε-Персеїди
6	3	{39, 59, 79}	Новий
7	3	{29, 69, 77}	Новий гіперболічний
8	2	{11, 64}	Новий
9	3	{32, 41, 48}	Новий
10	3	{12, 55, 68}	Новий
11	5	{7, 20, 35, 47, 61}	Новий
12	3	{28, 33, 53}	Новий
13	2	{31, 45}	Новий
14	4	{21, 36, 56, 76}	Новий

бірки по два метеори в кожному, то отримаємо результати, приведені в табл. 4, варіанти 3-1, 3-2, 3-3, та на рис. 1, в. При такому розбитті було доцільно користуватися значенням швидкостей метеорів (див. [3]). Видно, що для варіантів 3-1 і 3-3 для цих пар метеорів дійсно зменшилося розсіювання усіх параметрів (крім швидкості у парі 3-3). Однак, хоча пара 3-2 і показує суттєве зменшення розсіювання швидкості, за всіма іншими параметрами вона знижує імовірність належності даних двох метеорів до одного потоку.

Вибір варіанту належності метеорів з даної базової вибірки до одного потоку чи потоків (тобто необхідність розбиття вибірки на складові) балансує, з одного боку, на фізичній необхідності ділення вибірки взагалі, та з іншого боку на розумінні того факту, що при цільовому (не випадковому) зменшенні вибірки розсіювання параметрів має зменшуватися незалежно від фізичних характеристик. Тобто, чим меншою стає вибірка, тим менші характеристики розсіювання вона демонструє. З урахуванням сказаного вище оптимальним є варіант 1 (рис. 1, а). Його ми за-

Таблиця 6. Параметри нових метеорних мініпотоків

Міні-потік	α_{GR}	σ_{α}	δ_{GR}	σ_{δ}	ν_G	σ_{ν}	a	σ_a	e	σ_e	i	σ_i	ω	σ_{ω}	R	$\Delta R_{\max}$
1	10.99	4.46	-0.55	3.44	18.95	1.54	1.26	0.19	0.61	0.05	3.41	3.36	111.84	6.11	358.70	3.98
2	15.12	3.81	11.07	2.22	31.09	5.45	2.01	0.94	0.84	0.08	6.99	3.84	307.79	8.08	180.02	6.10
3	66.67	3.03	53.34	3.32	62.50	2.93	6.74	14.55	0.97	0.15	124.34	7.05	219.17	5.35	178.24	4.22
4	88.93	7.50	51.52	2.23	62.86	4.28	3.76	2.12	0.66	0.19	130.47	4.36	185.56	23.49	179.44	6.18
(4*)	91.90	8.08	51.63	3.68	62.00	3.80	2.67	3.09	0.73	0.33	130.12	6.45	177.35	23.75	179.23	8.14
5	65.72	7.99	41.05	1.96	65.38	2.17	12.74	6.87	0.95	0.10	142.78	7.03	237.64	16.72	178.94	7.43
(5*)	67.11	7.59	40.40	2.24	65.55	1.92	6.72	10.81	0.93	0.10	144.63	7.35	235.89	15.00	178.89	5.19
6	78.30	7.19	29.71	4.45	64.03	1.73	2.15	0.93	0.56	0.20	167.09	7.68	233.73	23.93	179.93	8.20
(6*)	73.82	10.72	28.99	3.90	63.69	1.57	2.41	0.92	0.63	0.23	167.12	6.27	240.17	23.40	179.65	12.08
7	69.66	7.99	34.53	4.91	87.43	15.36	-1.86	2.64	3.09	2.00	160.15	8.26	213.65	2.80	179.93	8.65
8	126.52	0.71	53.58	2.66	56.04	1.77	3.36	0.59	0.79	0.04	112.19	4.66	108.65	1.10	179.25	1.91
9	25.22	21.92	75.85	2.97	44.61	4.03	2.59	0.61	0.62	0.09	76.77	1.01	211.46	1.93	179.55	7.02
10	63.67	20.46	78.85	1.24	46.93	2.78	6.35	3.61	0.80	0.13	83.77	3.77	194.39	9.27	179.57	4.25
11	274.99	10.25	78.38	6.06	30.91	2.22	2.42	0.58	0.57	0.11	52.39	4.65	184.12	4.55	179.38	9.89
12	321.61	5.14	5.31	4.74	10.61	4.50	2.37	0.92	0.55	0.23	5.46	2.59	220.52	4.18	179.52	7.49
13	346.90	2.45	20.14	1.20	20.98	5.99	3.40	2.32	0.73	0.20	15.30	4.42	257.62	2.09	179.66	1.84
14	347.50	4.80	1.55	3.88	18.56	2.09	2.87	0.54	0.74	0.05	3.56	2.38	250.84	7.60	179.68	6.29
(14*)	348.24	4.48	2.71	4.24	18.29	1.91	2.66	0.67	0.72	0.07	3.96	2.25	253.13	8.34	179.51	6.52

Зірочками позначено уточнені варіанти мініпотоків №№ 4, 5, 6 та 14, утворені після додавання до них метеорів 2001 р.

лишимо як кінцевий результат для даної групи метеорів.

У результаті опрацювання усіх шести компактних груп метеорів було виділено 14 нових мініпотоків. У табл. 5 приведено кількість метеорів 2003 р., що формують даний мініпотік, їхні номери у відповідності до [3], класифікацію та внутрішній номер мініпотіку. Середні параметри потенційно нових мініпотоків приведено в табл. 6.

Слід зауважити про можливу випадковість об'єднання метеорів у певні структури, користуючись лише результатами спостережень за один рік. Але в кінцевому варіанті висновки про мініпотіки, зроблені за результатами спостережень 2003 р., уточнюються з використанням даних спостережень 2001 р.

Наступним кроком після виділення ряду нових мініпотоків за 2003 р. має бути перевірка метеорів, що раніше були зараховані до відомих потоків як ненадійне їхнє підтвердження, на предмет більшої близькості за критичними параметрами до нових мініпотоків. Так, метеорний потік ω -Пісцид був ненадійно підтверджений метеорами № 10 (2001 р.) і № 30 (2003 р.). Однак після зіставлення параметрів цих метеорів з параметрами нових мініпотоків було встановлено, що метеор № 10 (2001 р.) значно ближчий до нового мініпотіку № 14 (табл. 6). Тому для підтвердження потоку ω -Пісцид залишається один метеор № 30 (2003 р.). Метеор № 38 (2003 р.), який досить ненадійно підтверджував потік β -Ауригід (див. табл. 3), виявився набагато ближчим до нового мініпотіку № 4 (табл. 6).

Далі слід перевірити метеори 2001 р. на можливу належність до нових мініпотоків за критичними параметрами. Так, наприклад, новий мініпотік № 4 (табл. 6) складався з п'яти метеорів 2003 р. (№№ 15, 38, 42, 46, 65). Виявилося, що два метеори 2001 р. № 7 та № 18 також дуже близькі за параметрами до нового мініпотіку.

В ряді випадків нові мініпотіки асоціювались нами з відомими потоками за близькістю більшості параметрів. Так новий мініпотік № 2 (табл. 6) вважаємо потоком Північних δ -Пісцид. Але оскільки просторово радіант потоку Північних δ -Пісцид лежить за межами зони радіації нового мініпотіку № 2, то пропонуються нові

координати для радіанта Північних δ -Пісцид. Аналогічно з новим потоком № 5 (табл. 6) — чотири метеори 2003 р. та один 2001 р. — він асоціюється нами з встановленим потоком Вересневих ϵ -Персеїд, хоча радіант останнього також виходить за межі радіації нового потоку. Тому в цьому випадку також пропонуються нові координати радіанта Вересневих ϵ -Персеїд. З іншого боку, є нові мініпотіки (№ 4 у табл. 6), в зоні радіації яких та поряд лежать кілька радіантів відомих потоків (Жовтневі δ -Ауригиди та Вересневі Лінсиди), однак за всіма іншими параметрами вони різняться.

Цікавою є група гіперболічних метеорів, яку ми об'єднали в один мініпотік № 7 (табл. 6). Хоча швидкість метеорів розраховувалась з великими похибками, дані метеори утворюють відносно компактну групу, а крім того, добре узгоджуються за іншими параметрами.

ВИСНОВКИ

Приведено результати ототожнення метеорів з відомими метеорними потоками та відкриття нових мініпотоків за результатами спостережень 2001 та 2003 рр.

Підтверджено активність таких метеорних потоків (див. рис. 2):

- Вересневі ι -Кассіопеїди (SiC) одним метеором № 4 (2001 р.);
- ν -Драконіди (nD) двома метеорами № 5 (2001 р.) і № 37 (2003 р.);
- Південні δ -Пісциди (SdP) двома метеорами № 11 (2001 р.) і № 44 (2003 р.);
- ω -Пісциди (ω P, рис. 2) одним метеором № 30 (2003 р.);
- κ -Аквариди (κ A) одним метеором № 24 (2003 р.);
- Жовтневі Каприкорніди (OC) одним метеором № 43 (2003 р.);
- σ -Оріоніди (sO) одним метеором № 58 (2003 р.).

Щодо нових чотирнадцяти мініпотоків, то більшість інформації не змінилася (табл. 6 та рис. 2). Лише потоки №№ 4, 5, 6 та 14 зазнали змін; відповідні параметри позначено у табл. 6 зірочками. Потік № 4 було доповнено двома метеорами 2001 р.: № 7 і № 18, мініпотік № 5 — метеором № 15 (2001 р.);

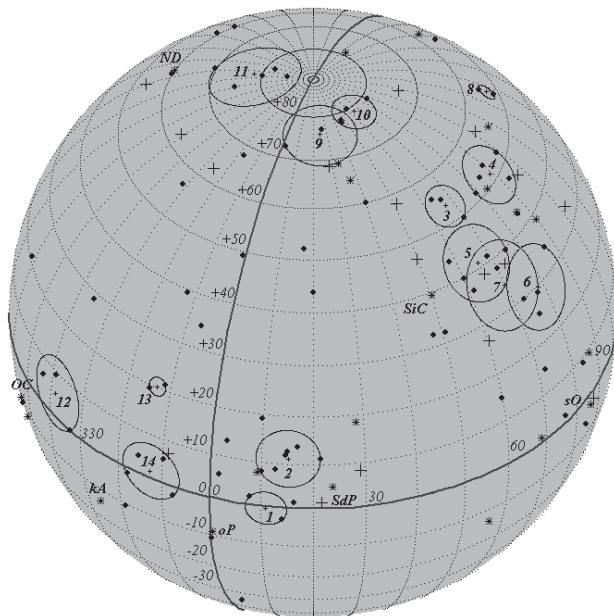


Рис. 2. Проекція небесної сфери на площину (вид ззовні). Хрестики — метеори 2001 р. (табл. 1), точки — метеори 2003 р. [3], зірочки — радіанти відомих потоків [6], кола з центрами — нові мініпотоки (кутовий радіус кола відповідає максимальній зоні радіації), літери — підтверджені потоки з [6], див табл. 2: SiC — Вересневі і-Кассіопейди, nD — ν -Драконіди, SdP — Південні δ -Пісциди, oP — ω -Пісциди, kA — κ -Аквариди, OC — Жовтневі Капрікорніди, sO — σ -Оріоніди

мініпотік № 6 — метеором № 16 (2001 р.), мініпотік № 14 — метеором № 10 (2001 р.).

Таким чином, ми підтвердили сім слабких метеорних потоків з роботи [6]. Два потоки — Північні δ -Пісциди та Вересневі ε -Персеїди — підтверджено з уточненням їхніх параметрів, включно із координатами радіантів і елементами орбіти. Пропонуються до розгляду параметри дванадцяти метеорних мініпотоків як нових (табл. 6, рис. 2). На рис. 2 нові мініпотоки нумеровані у відповідності до табл. 6, зони радіації — лише за 2003 р., тобто також у відповідності до табл. 6 (у більшості випадків доповнення потоків метеорами 2001 р. зони мають бути розширені у відповідності із параметрами табл. 6, позначеними зірочками).

1. Козак П. Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке

телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небес. тел. — 2002. — **18**, № 5. — С. 471—480.

2. Козак П. Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небес. тел. — 2003. — **19**, № 1. — С. 62—76.
3. Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Кінематичні характеристики вересневих метеорів за базисними телевізійними спостереженнями 2003 року // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 4. — С. 51—62.
4. Кручиненко В. Г., Козак П. Н. Взрывные кратеры на поверхности космических аппаратов, образованные метеороидами и частицами космического мусора // Космічна наука і технологія. — 2001. — **7**, № 5/6. — С. 71—74.
5. Hughes D. W. P/Halley dust characteristics: a comparison between Orionid and Eta Aquarid meteor observations and those from the flyby spacecraft // Astron. and Astrophys. — 1987. — **187**, N 1-2. — P. 879—888.
6. Jopek T. J. Meteor Data Center of International Astronomical Union. — 2009. — <http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007>.
7. Kozak P. «Falling star»: Software for processing of double-station TV meteor observations // Earth, Moon and Planets. — 2008. — **102**, N 1-4. — P. 277—283.
8. Kozak P. «Falling star»: Software for processing of double-station TV meteor observations // Advances in Meteoroid and Meteor Science / Eds J. M. Trigo-Rodrigues, F. J. M. Rietmeijer, J. Llorca, D. Janches. — Springer, 2008. — P. 277—283.
9. Lyytinen E., van Flandern T. Predicting the strength of Leonid outbursts // Earth, Moon and Planets. — 1998. — **82/83**. — P. 149—166.
10. Maslov M. Future Draconid outbursts (2011—2100) // WGN, the Journal of the IMO. — 2011. — **39**, N 3. — P. 64—67.
11. Molau S., Rentdel J. A Comprehensive List of Meteor Showers Obtained from 10 Years of Observations with the IMO Video Meteor Network // WGN: the Journal of the IMO. — 2009. — **37**, N 4. — P. 98—121.
12. Svoren J., Porubcan V., Neslusan L. Current Status of the photographic meteoroid orbits database and a call for contributions to a new version // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — **102**, N 1-4. — P. 11—14.
13. SonotaCo A meteor shower catalog based on video observations in 2007—2008 // WGN, the Journal of the IMO. — **37**, N 2. — 2009. — P. 55—62.
14. Vaubaillon J., Watanabe J., Sato M., et al. The coming 2011 Draconids meteor shower // WGN, the Journal of the IMO. — 2011. — **39**, N 3. — P. 59—63.

Надійшла до редакції 28.11.11

*P. M. Kozak, O. O. Rozhilo, Yu. G. Taranukha,
V. G. Kruchynenko*

**A SEARCH FOR METEOR SHOWER RADIANTS
FROM RESULTS OF DOUBLE-STATION
TV OBSERVATIONS IN 2001 AND 2003**

We give some results of a search for new faint meteor showers and of confirmation of existent one on the basis of original double-station TV observations of meteors. Our results of kinematical processing of the observations made in September 2001 are presented. The observations carried out in September

2003 were published earlier. The confirmation of the existent mini-showers are performed independently for the different years. A search of new mini-showers is made for the year 2003 only, but the results of the observations made in 2001 are used to improve parameters of new showers. Seven existent mini-showers are confirmed; two of them are confirmed on the basis of the observations during both intervals. Besides, 14 compact groups are selected which can be considered as new mini-showers. Two of them are identified with existent showers, but we propose a more accurate values for mean kinematical parameters of these showers.

УДК 612.018:612.015:612.75

В. Я. Березовський¹, І. Г. Літовка¹, С. П. Весельський², Т. М. Заморська¹, Р. В. Янко¹

¹ Інститут фізіології імені О. О. Богомольця Національної академії наук України, Київ

² Інститут фізіології імені Петра Богача Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

ВПЛИВ ЕКЗОГЕННОГО МЕЛАТОНІНУ НА ЛІПІДНИЙ ТА АМІНОКИСЛОТНИЙ СКЛАД ОРГАНІЧНОГО МАТРИКСУ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

Досліджувався вплив екзогенно введеного мелатоніну на ліпідний та амінокислотний склад органічного матриксу у 11- і 15-місячних щурів-самців лінії Wistar. Відмічено вірогідне підвищення концентрації загальних фосфоліпідів у 11- і 15-місячних тварин на 19 % і 26 % відповідно. Екзогенний мелатонін у концентрації 1 мг на 1 кг маси тіла вірогідно знижує концентрацію цистину на 35 %, орнітину на 59 %, лізину на 33 % у кістковій тканині 11-місячних щурів. У 15-місячних щурів спостерігалось вірогідне зниження концентрації серину і аспарагінової кислоти на 29 %. Висловлено припущення, що екзогенний мелатонін опосередковано впливає на кістковий метаболізм шляхом підвищення вмісту полярних ліпідів та зниження вільних амінокислот. Це свідчить про активацію процесів ремоделювання кісткової тканини та інтенсифікацію в ній процесів синтезу колагену.

ВСТУП

Професійна діяльність людини у космічному польоті проходить в незвичайних умовах. Вплив гіпергравітації на старті і при спуску з орбіти, тривале перебування в умовах мікрогравітації і замкненого простору, гіпокінезія та гіподинамія напружують адаптивні системи організму та змінюють фізіологічний перебіг метаболічних процесів. Перебудова кісткової тканини (КТ) за відсутності гравітації супроводжується певними змінами спочатку в органічному, а потім і неорганічному матриксі, що створює загрозу здоров'ю екіпажу.

Виходячи з загальнобіологічних міркувань та на підставі раніше проведених досліджень ми звернули увагу на мелатонін. Він належить до циркадно-залежних регуляторів метаболізму та кальцієвого гомеостазу кістки і секретується шишкоподібною залозою. Його клітини розміщуються у сітківці ока, шлунково-кишковому тракті, кістковому мозку [1, 16]. Функціонально всі клітини, що продукують ме-

латонін, мають стосунок до так званої дифузної нейроендокринної системи, універсальної системи адаптації і підтримки гомеостазу організму. Головними ефектами цього гормону на кісткову тканину є: стимулювання диференціації та активації остеобластів, зниження диференціації остеокластів, нейтралізація утворених остеокластами вільних радикалів, посилення синтезу колагенових та неколагенових білків кісткового матриксу [1, 12, 14].

Проте є протилежні гіпотези щодо впливу мелатоніну на ремоделювання кісткової тканини та роль остеобластів у цьому процесі. Островська та ін. виявили кореляцію між високими концентраціями мелатоніну у плазмі крові щурів-самців лінії Вістар і низькими рівнями маркерів формування кістки [13]. У роботі дослідженні аналізувались ефекти мелатоніну на культуру остеобластів у присутності остеокластів. При цьому спостерігалось пригнічення активності обох типів клітин, що дозволило зробити висновок про встановлення балансу між ними.

У нашій попередній роботі [2] виявлено вірогідне зниження для дорослих щурів активності лужної фосфатази (ЛФ) у сироватці крові у 1.6 рази порівняно з контролем, тоді як у КТ актив-

ність цього ферменту була у 2.4 вірогідно вищою за вихідні дані. Тобто, можливе стимулювання синтезу як колагену I типу, так і неколагенових білків.

Таким чином, постає питання, чи може екзогенний мелатонін, введений у фізіологічних дозах, змінити метаболізм кістки і вплинути на її формування?

Мета цієї роботи дослідити вплив екзогенного мелатоніну на ліпідний та амінокислотний склад органічного матриксу кісткової тканини дорослих шурів.

МЕТОДИКА

Досліди тривалістю 28 діб виконано у весняний період на 42 шурах-самцях лінії Вістар віком 11 та 15 місяців. Саме весна характеризується не тільки авітамінозом, а і перебудовою світлового режиму, що відображається на діяльності епіфізу. Протягом експерименту всі тварини перебували в уніфікованих умовах зі стандартним раціоном харчування та природним циклом світло/темрява (тривалість освітлення з 6:30 до 17:30) і мали вільний доступ до води.

Тваринам досліджуваної групи перорально у дозі 1 мг/кг маси тіла вводили 1 мл водної суспензії мелатоніну (Unipharm Inc., США) о 17:00, тобто у той час, коли його фізіологічна концентрація була мінімальною. Контрольним шурам у той самий час вводили еквівалентну кількість дистильованої води.

Загальний стан тварин та інтенсивність метаболізму кісткової тканини контролювали за допомогою біохімічних методів дослідження. Досліди провадили з виконанням міжнародних вимог про гуманне ставлення до тварин.

Матеріалом для досліджень були свіжовиделені стегові кістки шурів та сироватка крові, які одержували від декапітованих під рауш-наркозом тварин. У сироватці крові шурів методом імуноферментного аналізу за допомогою стандартних наборів реактивів визначали С-термінальні пропептиди колагену I типу (CICP) (IDS Inc., США), С-термінальні телопептиди колагену I типу (β -CrossLaps) (IDS Inc., США), піридинолін («Quidel Corporation», США). Методом тонкошарової хроматографії визначали концентра-

цію вільних амінокислот у сироватці крові та КТ і ліпідів у КТ.

Для визначення основних фракцій ліпідів у КТ стегову кістку очищали від м'язів і відмивали від кісткового мозку. Наважку КТ (100 мг) знежирювали і зневоднювали у спирт:ацетоні (1 : 2) [8]. Потім спирт:ацетон випарювали, а сухий залишок ліпідів розчиняли в 100 мкл суміші хлороформ-бензол-ацетон (1 : 2 : 1) і наносили на розмічену хроматограму мікрошприцем. Хроматографічне розділення загальних ліпідів проводили на фабрично виготовлених пластинах Silufol (ЧССР) розміром 15 × 15 см, попередньо активуючи їх впродовж 1 години в термостаті при 110 °С. В цей же час у хроматографічну камеру для кращого насичення вносять фільтрувальний папір і наливають суміш розчинників: гексану, діетилового ефіру та оцтової кислоти (7 : 23 : 1) [3].

Для визначення амінокислотного складу у КТ знежирену і зневоднену стегову кістку піддавали гідролізу при 100 °С 20 хвилин у розчині 0.04 М CH_3COOH (1 : 10). Центрифугували 30 хв при 3 000 об/хв. Супернатант випарювали при 40–60 °С і розчиняли в 0.1 мл 50 % $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Наносили на розмічену хроматографу мікрошприцем по 20 мкл. Для розгонки використовували систему розчинників, яка включала ізоаміловий спирт, бутиловий спирт, оцтову кислоту, мурашину кислоту та воду (9 : 7 : 4 : 25 по об'єму) [5, 6].

Цифрові дані обробляли з використанням пакету програмного забезпечення Magellan 3.0, програми Microsoft Excell 2003. Для оцінки вірогідності відмінностей між двома вибірками використовували t-критерій Ст'юдента.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

У всіх органах і тканинах ссавців відбуваються вікові зміни структури і функцій. Однією з перших гальмується спроможність до синтезу колагену. Швидкість утворення або руйнування органічного матриксу КТ можна оцінювати при вимірюванні специфічних ферментів кісткоутворювальних чи кісткоруйнівальних клітин, таких як лужна та кисла фосфатаза, що ми і зробили у нашій роботі [2]. Але можна йти й іншим шляхом, визначаючи компоненти, які над-

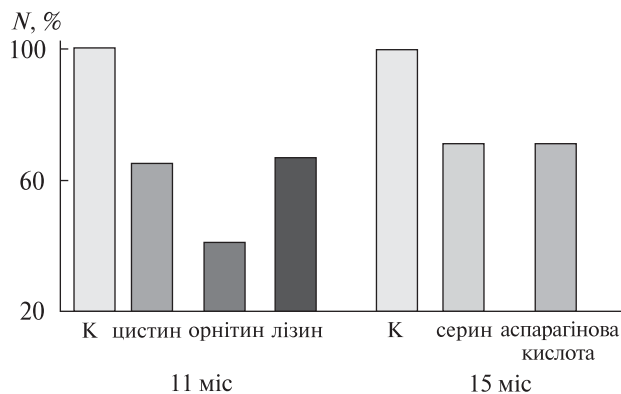


Рис. 1. Достовірні зміни концентрації N вільних амінокислот у кістковій тканині контрольних та дослідних груп шурів (рівень вірогідності $P > 0.95$)

ходять в кровоток під час синтезу чи резорбції кістки.

Під час позаклітинного перетворення колагену I типу, перш ніж відбудеться збір фібрил, від його молекули відщеплюються аміно- та карбоксикінцевий пептиди. Ці пептиди циркулюють у крові. Колаген у найбільшій концентрації міститься у КТ. Через те що швидкість метаболізму тут значно вища, ніж у деяких інших видах сполучної тканини (наприклад у хрящі), то, можливо, головним постачальником С-термінального про- та телопептидів колагену I типу, піридиноліну у біологічних рідинах є саме КТ.

Однак при визначенні цих показників у сироватці крові 11- та 15-місячних шурів ми спостерігали лише тенденцію до їхнього зниження у цілому по групі після введення мелатоніну.

Проте достовірні зміни складу вільних амінокислот як у КТ, так і в сироватці крові відбувалися. Встановлено, що концентрація вільних амінокислот, найбільш значущих для сполучної тканини, синтезу колагену, змінювалася по-різному. Ми відзначимо тільки ті з них, що змінювалися достовірно (рівень вірогідності $P > 0.95$). Так, зменшилася відносно контрольних значень концентрація цистину (зміцнює сполучну тканину) на 35 % у КТ 11-місячних шурів, орнітину — на 59 %, а вміст лізину, дефіцит якого гальмує синтез білка у сполучній тканині і безпосередньо бере участь у синтезі колагену — на 33 %. У сироватці крові цих тварин знизилася

концентрація серину і аспарагінової кислоти на 26 %, а валіну і триптофану — на 33 % (рис. 1).

У 15-місячних тварин у КТ знизився на 29 % вміст серину і аспарагінової кислоти. У той же час у сироватці крові зросла 39 % концентрація цистеїну і цистину, на 45 % — орнітину і глюкозаміну, на 57 % — аргініну і гістидину, на 43 % — лізину і аспарагіну, на 15 % — гліцину і метіоніну, на 32 % — серину і аспарагінової кислоти, на 25 % — аланіну, на 28 % — валіну і триптофану.

Із вищенаведеного випливають щонайменше три висновки.

1. Екзогенний мелатонін у концентрації 1 мг на 1 кг маси тіла не впливає на тело- і пропептиди колагену I типу та піридинолін органічного матриксу КТ.

2. Екзогенний мелатонін у зазначеній дозі впливає на склад вільних амінокислот КТ, у тому числі цистину і лізину, які безпосередньо беруть участь у синтезі колагену. Це свідчить про те, що мінімальна концентрація речовини виникає в місці її інтенсивного поглинання. Тому знижений рівень цих амінокислот вказує на інтенсифікацію процесів синтезу колагену органічного матриксу КТ.

3. Між змінами у пулі вільних амінокислот у КТ та сироватці крові після впливу екзогенного мелатоніну виявлено складну нелінійну залежність.

Ліпіди є важливою складовою сполучної тканини. Проте їхню роль у мінералізації кісткової тканини вивчено недостатньо. Зокрема це стосується ролі білково-ліпідних комплексів у процесах остеогенезу, в утворенні ядер кристалізації.

Ліпідні фракції у стегновій кістці контрольних 11-місячних шурів розподілялися наступним чином: 28 % припадало на загальні фосфоліпіди, 31 % — на загальний холестерин, 20 % — на тригліцериди і 21 % — вільні жирні кислоти. Співвідношення між цими фракціями у загальному пулі ліпідів 1.1:1.2:0.8:0.9. При порівнянні даних контрольної і дослідної груп тварин цього віку було виявлено вірогідне підвищення концентрації фосфоліпідів на 19 %, зниження вмісту загального холестерину і вільних жирних кислот відповідно на 22.4 % і 23.0 %. Зміна вмісту загального холестерину відбувалася за рахунок вільно-

го холестерину, концентрація якого знижувалася на 26 % ($P < 0.05$) відносно контрольних значень (рис. 2, а).

Все це призвело до перерозподілу ліпідних фракцій у КТ досліджуваної групи тварин: 35 % припадало на загальні фосфоліпіди, 25 % — на загальний холестерин, 22 % — на тригліцериди і 18 % — вільні жирні кислоти. Відповідно змінювалося і співвідношення між ліпідними фракціями як 1.4:1.0:0.9:0.7.

У контрольних 15-міс. щурів розподіл ліпідних фракцій відбувався таким чином: 33 % припадало на загальні фосфоліпіди, 30.4 % — на загальний холестерин, 18.5 % — на тригліцериди і 18.1 % — вільні жирні кислоти, або 1.3:1.2:0.8:0.7. Спрямованість змін ліпідних фракцій у 15-місячних щурів після впливу мелатоніну була такою ж, як і у 11-місячних тварин (рис. 2, б).

Але ліпідні фракції у загальному пулі ліпідів розподілялися дещо інакше: 38 % припадало на загальні фосфоліпіди, 28 % — на загальний холестерин, 19 % — на тригліцериди і 15 % — вільні жирні кислоти, або 1.5 : 1.1 : 0.7 : 0.6.

Таким чином, зміни вмісту вільних амінокислот та ліпідних фракцій і їхній розподіл у загальному пулі ліпідів у дорослих 11- і 15-місячних щурів після впливу мелатоніну були односпрямованими, але мали свої особливості. Більш виражені зміни відбувалися у 11-місячних тварин. Це дозволяє висловити припущення, що екзогенний мелатонін опосередковано впливає на кістковий метаболізм шляхом підвищення вмісту полярних ліпідів та зниженням вільних амінокислот, які беруть безпосередню участь у синтезі колагену. Отримані результати добре узгоджуються з літературними даними, де показано, що мелатонін посилює синтез колагенових і неколагенових білків органічного матриксу КТ [12], стимулює процеси мінералізації [10, 11]. Вірогідність саме такого механізму дії мелатоніну можна віднести за рахунок того, що саме полярні ліпіди, або, вірніше, білок-ліпідні комплекси забезпечують зв'язок між органічним і неорганічним матриксом [7, 9]. За останніми даними із компактної кістки бика було виділено супрамолекулярний комплекс, який складався з рівних долей колагену, кальційзв'язувальних білків і полярних ліпідів,

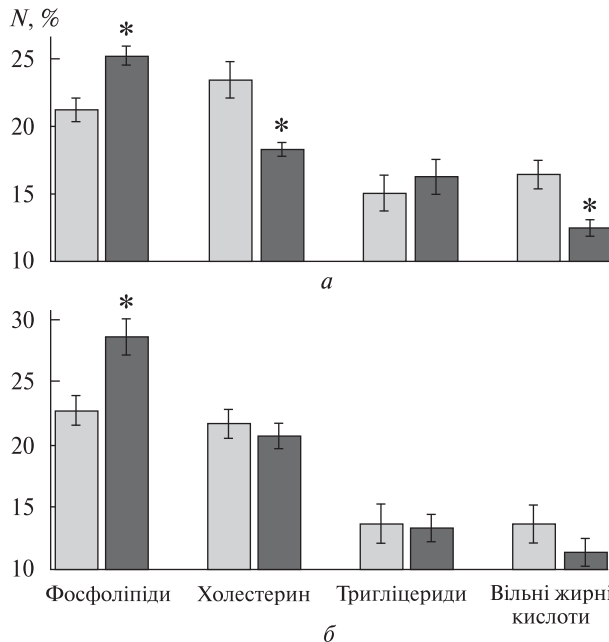


Рис. 2. Достовірні зміни ліпідних фракцій у контрольних і дослідних щурів: а — 11-місячних, б — 15-місячних (рівень вірогідності $P > 0.95$)

що стимулюють преципітацію ортофосфатів кальцію і їхню трансформацію в гідроксиапатит, який зумовлює жорсткість кістки [4].

Отримані нами дані свідчать, що після впливу екзогенного мелатоніну у 11- і 15-місячних тварин збільшувалась концентрація загальних фосфоліпідів та зменшувалась концентрація вільних амінокислот, що беруть участь у синтезі колагену. Це забезпечує умови для підвищення здатності фосфоліпідів приєднувати кальцій та інші катіони, посилює зв'язок між полярними ліпідами і білком, забезпечує повноцінне функціонування КТ.

1. Анисимов В. Н. Мелатонин: роль в организме, применение в клинике. — СПб.: Изд-во «Система», 2007. — 40 с.
2. Березовський В. Я., Літовка І. Г., Костюченко О. С., Янко Р. В. Вплив мелатоніну на процеси фізіологічної регенерації кісткової тканини молодих і дорослих щурів // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 75—81.
3. Деклараційний пат. на винахід № 33564А. Спосіб підготовки проб біорідин для визначення вмісту речовин ліпідної природи / С. П. Весельський, П. С. Лященко, С. І. Костенко та ін. — Заявл. 11.03.99; Опубл. 15.02.01 // Бюл. — 2001. — № 1.

4. Десятниченко К. С., Леонтьев В. К. Супрамолекулярный комплекс внеклеточного матрикса костной ткани, инициирующий биологическую минерализацию // Вестн. Российской Акад. мед. наук. — 2009. — № 8. — С. 40—44.
5. Казначеева А. И., Злыднев Н. З. Содержание свободных аминокислот у практически здоровых лиц в плазме крови, эритроцитах и моче // Лаб. дело. — 1976. — № 8. — С. 479—480.
6. Коробейникова Э. М., Мещерякова Г. В. Определение содержания свободных аминокислот в сыворотке крови и моче здоровых детей // Лаб. дело. — 1981. — № 4. — С. 221—224.
7. Леонтьев В. К., Десятниченко К. С., Левченко В. Т. О роли белковой матрицы и других факторов в биологическом обызвестлении // Белки и ферменты в клинических и экспериментальных исследованиях. — Омск, 1977. — С. 46—49.
8. Петровский В. И., Регеранд Т. И., Лизенко Е. И. Экстракция, разделение и количественное определение липидных фракций сыворотки крови // Лаб. дело. — 1986. — № 6. — С. 339.
9. Слуцкий Л. И. Биохимия нормальной и патологически измененной соединительной ткани. — Л.: Медицина, 1969. — 375 с.
10. Cardinali D. P., Ladizesky M. G., Boggio V. Melatonin effects on bone: experimental facts and clinical perspectives // J. Pineal Res. — 2003. — N 34. — P. 81—87.
11. Cutando A., Gomez-Moreno G., Arana C., et al. Melatonin: Potential functions in the oral cavity // J. Periodontol. — 2007. — 78, N 6. — P. 1094—1102.
12. Nakade O., Koyama H., Aiji H., et al. Melatonin stimulates proliferation and type I collagen synthesis in human bone cells in vitro // J. Pineal Res. — 1999. — 27, N 2. — P. 106—110.
13. Ostrowska Z., Wolkowska-Pokrywa K., Kos-Kudla B., et al. Melatonin and bone status // Pol. Merkur. Lekarski. — 2006. — 21, N 124. — P. 389—93.
14. Roth J. A., Byung-Gook Kim, Fei Song, et al. Melatonin promotes osteoblasts differentiation and bone formation // J. biol. chemistry. — 1999. — 274, N 45. — P. 22041—22047.
15. Sanchez-Barcelo E. J., Mediavilla M. D., Tan D. X., Reiter R. J. Scientific basis for the potential use of melatonin in bone disease: osteoporosis and adolescent idiopathic scoliosis // J. Osteoporosis. — 2010. — N 1. — 10 p.
16. Wolden-Hanson T., Mitton D. R., McCants R. L., et al. Daily melatonin administration to middle-Aged Male Rats Suppresses Body Weight, Intraabdominal Adiposity, and plasma leptin and insulin independent of food intake and total body fat // Endocrinology. — 2000. — 41, N 2. — P. 487—497.

Надійшла до редакції 12.03.12

V. A. Berezovskii, I. G. Litovka, S. P. Veselskii,
T. M. Zamorska, R. V. Yanko

EXOGENOUS MELATONIN INFLUENCE ON LIPID AND AMINO ACID COMPOSITION OF BONE'S ORGANIC MATRIX

We consider the influence of exogenous melatonin on lipid and amino acid composition of the organic matrix for 11- and 15-month Wistar male-rats. Our study shows a significant increase in the concentration of total phospholipids for 11- and 15-month animals by 19 % and 26 %, respectively. The exogenous melatonin in a dose of 1 mg/kg b. w. significantly reduces the concentration of cystine (by 35 %), ornithine (by 59 %), and lysine (by 33 %) in the bone tissue of 11-month rats. For the 15-month rats, a reliable decrease in the concentration of serine and aspartic acid by 29 % is observed. We believe that exogenous melatonin has an indirect effect on bone metabolism by increasing polar lipids and by reducing free amino acids. This points to the activation of bone remodeling processes and to collagen synthesis intensification.

УДК (55:528. 8):061. 6] (477)

В. І. Лялько, М. О. Попов, О. Д. Федоровський, О. І. Левчик

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

ДЕРЖАВНА УСТАНОВА «НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ» (до 20-річчя заснування)

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України (ЦАКДЗ ІГН НАН України) було засновано Постановою Президії АН України № 150 від 20.05.1992 р. на базі відділу тепломасопереносу в земній корі Інституту геологічних наук НАН України та Київського науководо-слідного інституту космоаерометодів колишнього Міннафтогазпрому СРСР як самостійну юридичну установу.

Директор Центру — академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. І. Лялько. Заступники директора: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України М. О. Попов, кандидат технічних наук В. Г. Прокопенко. Вчений секретар: кандидат біологічних наук О. І. Левчик.

Організаційно ЦАКДЗ складається з п'яти відділів:

1. Енергомасообміну в геосистемах (завідувач відділу — академік НАН України В. І. Лялько).
2. Аерокосмічних досліджень в геоєкології (завідувач відділу — кандидат геологічних наук А. Г. Мичак).
3. Аерокосмічних досліджень в геології (завідувач відділу — доктор геологічних наук С. М. Єсипович).

4. Геоінформаційних технологій в дистанційному зондуванні Землі (завідувач відділу — доктор технічних наук М. О. Попов).

5. Системного аналізу (завідувач відділу — член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський).

У складі Центру працює понад 100 співробітників, з них майже дві третини — науковці, серед яких академік НАН України, член-кореспондент НАН України, шість докторів наук, 22 кандидати (геологічних, географічних, фізико-математичних, технічних і біологічних наук), навчається вісім аспірантів.

В Центрі розвивається наукова школа «Енергомасообмін в геосистемах». Досліджуються процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні та біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів. Дослідження мають фундаментальний та водночас прикладний характер.

Основні наукові напрями та завдання Центру

• теоретико-методичні та практичні дослідження природних ресурсів України, зокрема при пошуках, розвідці та розробці родовищ корисних копалин із застосуванням дистанційних засобів аерокосмічного базування;

• створення наукових основ аерокосмічного екологічного моніторингу території України з

розробкою фізико-математичних моделей випромінювання та розсіювання в різних діапазонах електромагнітного спектру, які обумовлені земними утвореннями (рослинність, ґрунти, вода, повітря);

- теоретичне обґрунтування і експериментальна перевірка бортової апаратури та технології дистанційного зондування земних утворень в різних діапазонах електромагнітного спектру для вирішення природоресурсних та природоохоронних задач;

- міжнародна кооперація досліджень з дистанційного зондування Землі з метою залучення передового зарубіжного досвіду, апаратури і технологій для потреб розвитку народного господарства та охорони навколишнього середовища в Україні.

Головні задачі досліджень

Оцінка та менеджмент природних ресурсів:

- деталізація геологічної структури територій (вивчення активних екзогенних процесів, виявлення та локалізація активних розломних зон);

- оцінка територій і шельфової зони з метою пошуку родовищ нафти та газу;

- визначення вологості ґрунтів та рівня ґрунтових вод, пошук підземних водних резервуарів; оцінка стану та картування лісових угідь.

Екологічний моніторинг навколишнього середовища:

- оцінка морських акваторій та внутрішніх водоймищ (швидке виявлення розливів нафти і нафтопродуктів на водній поверхні, оцінка еколого-санітарного стану та якості води у водоймищах, виявлення промислових забруднень, контроль розподілу суспендованих речовин, зелених водоростей та ін.);

- оперативний моніторинг паводків, підтоплень, заболочування, лісових пожеж та інших природних катастроф;

- оцінка територій, забруднених важкими металами, радіонуклідами, пестицидами та іншими токсичними речовинами;

- вивчення міських агломерацій (динаміки розвитку і забудови міста, антропогенного впливу промисловості на довкілля).

Застосування даних ДЗЗ у сільському господарстві:

- інвентаризація посівів;
- оцінка стану сільгоспугідь (фенологічні спостереження, забезпеченість посівів добривом, вологою, визначення біомаси та продуктивності);

- прогнозування врожаю;

- оцінка параметрів стану ґрунтів.

Теоретичне обґрунтування і оцінка ефективності системи ДЗЗ на основі системного аналізу:

- оцінки ефективності апаратурних комплексів ДЗЗ, що функціонують на борту космічного апарата;

- формування складу комплексу апаратури, сукупність параметрів якого забезпечить виконання космічної програми ДЗЗ із найбільшою ймовірністю;

- оцінки ефективності функціонування системи ДЗЗ (з урахуванням космічних апаратів і наземної інфраструктури) на основі методу системної динаміки й інформаційних технологій.

У Центрі розроблено нові ефективні космічні методи та технології для вирішення ряду актуальних для України задач раціонального природокористування, зокрема для:

- пошуків нафтогазових покладів на суходолі та шельфі, що дозволило майже вдвічі підвищити існуючу результативність пошукових робіт і було практично апробовано не лише в Україні, але і в Російській Федерації, Туркменістані та Об'єднаних Арабських Еміратах;

- оцінки стану та врожайності агрокультур;

- оцінки екологічного стану територій і акваторій в режимі моніторингу;

- космічного моніторингу тепловтрат на урбанізованих територіях;

- космічного моніторингу (аудиту) балансу парникових газів.

Відділ енергомасообміну в геосистемах (до 1992 р. — відділ тепломасопереносу в земній корі), створений з метою проведення науково-дослідних робіт з дослідження енергомасообміну в геосистемах на основі комп'ютерного моделювання сучасних супутникових технологій; формування і реалізації єдиної наукової та науково-технічної політики Центру, розв'язання актуальних наукових проблем, підвищення його наукового потенціалу. У відділі виконано зна-

чний обсяг теоретико-методичних та практичних досліджень: моделювання процесів формування ресурсів та гідрогеологічних умов охорони підземних вод, розробка методів розрахунку тепло- і масопереносу в земній корі, обґрунтування захоронення токсичних промстоків у надра; розроблено критерії геотермічних пошуків корисних копалин, в т. ч. підземних вод та вуглеводневої сировини. Узагальнено теоретико-методичні основи застосування матеріалів космічних зйомок для вирішення актуальних задач раціонального природокористування, зокрема, пошуків нафтогазових покладів на шельфі, оцінки фітосанітарного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування стану і врожайності зернових культур та екологічної ситуації в екосистемах, розроблено та застосовано нові ефективні методи і технології синергетичної інтерпретації матеріалів сучасних аерокосмічних гіперспектральних зйомок. Вперше експериментально визначено основні балансові складові формування парникового ефекту в межах території України на основі матеріалів багатоспектральних космічних зйомок з метою виявлення кількісних показників для обґрунтування виділених Україні квот парникових газів відповідно до Кіотського протоколу. Розроблені довготермінові сценарії кліматичних та екологічних змін на регіональному та локальному рівні. Визначено стратегії адаптації, в тому числі в зв'язку з передбачуваною ескалацією природних катастроф.

Грунтуючись на вказаних теоретико-методичних дослідженнях і досягненнях, відділом виконано значний обсяг впроваджень цих результатів у вигляді договірних робіт з виробничими організаціями, Міністерством геології СРСР і УРСР, надзвичайних ситуацій та екоресурсів України, НАК «Нафтогаз України», з державними адміністраціями Києва, Херсона тощо.

Відділ аерокосмічних досліджень в геоекології засновано з метою організації і проведення науково-дослідних робіт у напрямі розробки теорії та методів використання матеріалів багатоспектральної аеро- та космічної зйомки для вирішення геоекологічних завдань. Основними завданнями та функціями відділу є створення нових методів та технологій комп'ютерного об-

роблення та інтерпретації аерокосмічних зображень в інтересах вирішення природоохоронних геоекологічних задач, розробки методології екологічного моніторингу в умовах сучасної трансформації урбанізованих територій на основі новітніх супутникових технологій дистанційного зондування Землі.

Вченими відділу розроблено методичні принципи і технології використання матеріалів дистанційної інформації при виконанні геолого-знімальних робіт в Україні. Побудовано просторово-часові моделі підтоплення ґрунтовими водами в умовах міських агломерацій за дистанційними даними. Розроблено методичні прийоми виявлення техногенного забруднення урбанізованих територій важкими металами та джерел забруднень водного середовища за допомогою наземного спектрометрування та використання матеріалів ДЗЗ. Створено методичні основи оцінки геоекологічного стану промислових центрів (для Нікополя, Борислава, Києва, Кривого Рогу). Результати проведених робіт по Києву використовують природоохоронні структури Київської міської держадміністрації.

Відділ аерокосмічних досліджень у геології створений на базі колишнього Київського відділу Інституту геології і розвідки горючих копалин Міннафтогазпрому СРСР (1976 р.). На початку 1992 р. він трансформувався в Інститут космоаерометодів, який у травні 1992 р. увійшов до складу ЦАКДЗ ІГН НАН України. Науковий напрям відділу — розробка наукового комплексу аерокосмічних, географічних та геолого-геофізичних методів для вирішення геологічних задач.

Створено нові технології пошуку покладів вуглеводнів на суші та шельфі за допомогою використання матеріалів космічного знімання. Проведено апробацію супутникової технології прогнозу покладів нафти і газу в межах Дніпровсько-Донецької западини, а на окремих її нафтогазопошукових площах виконано оцінку перспектив нафтогазоносності. Результати апробації демонструють високу достовірність технології прогнозу і відкривають перспективи прогнозування нових родовищ вуглеводнів, що дозволить значною мірою вирішити паливно-енергетичну проблему України за рахунок роз-

витку власної сировинної бази. Використання зазначеної технології дозволяє підвищити геологічну і економічну ефективність геологорозвідувальних робіт на нафту і газ, збільшити обсяг приросту запасів вуглеводневої сировини на фоні зниження фінансових витрат. Розроблено методику та виконано оцінку нафтогазового потенціалу шельфу Чорного моря дистанційними методами. Проведено рейтингову оцінку нафтогазоперспективних об'єктів на шельфі, структурно-геоморфологічних та геолого-геофізичних критеріїв для Північно-Західного шельфу Чорного та акваторії Азовського морів.

Відділ геоінформаційних технологій в дистанційному зондуванні Землі створено у 2004 р. з метою організації інформаційно-методичного та алгоритмічного забезпечення робіт з дистанційного зондування Землі.

Основні напрями досліджень — інформаційно-методичне та алгоритмічне забезпечення робіт з дистанційного зондування Землі, а саме: розроблення методичного та алгоритмічного забезпечення інтерпретації аерокосмічних зображень для вирішення тематичних задач дистанційного зондування Землі; обґрунтування вимог до обліку перспективних бортових комплексів ДЗЗ, розроблення методів оцінювання якості та інформаційних властивостей цифрових багато- та гіперспектральних аерокосмічних зображень; розроблення методології тестування створюваних супутникових технологій на основі геоінформаційних технологій та польових полігонних вимірювань; створення вітчизняної понятійно-нормативної бази у галузі дистанційного зондування Землі, її удосконалення і гармонізація з відповідними міжнародними стандартами та нормами.

Вченими відділу удосконалено теоретико-методичні основи обробки, оптимізації та аналізу гіперспектральних аерокосмічних зображень для вирішення типових тематичних задач ДЗЗ з використанням матеріалів гіперспектрального знімання; розроблено нові алгоритми автоматизованого оброблення та інтерпретації цифрових аерокосмічних зображень.

Відділ системного аналізу створений у 2002 р. з метою організації проведення науково-дослідних робіт в напрямі наукового обґрунтування

і впровадження методів системного аналізу у розв'язання геоекологічних і природоресурсних задач на основі аерокосмічної інформації ДЗЗ.

Основними напрямками досліджень є виконання науково-дослідних робіт, передбачених державними і відомчими замовленнями; фундаментальних, пошукових та прикладних науково-дослідних робіт та розробок за такими науковими напрямками: розробка наукових основ системного моделювання процесу одержання інформації космічними системами дистанційного зондування Землі, визначення їхньої оптимальної структури, параметрів та ефективності використання; розробка системної методології розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення ресурсних і екологічних задач природокористування.

У відділі розроблено наукові основи моделювання процесу одержання інформації космічними системами ДЗЗ, визначено їхню оптимальну структуру, параметри та ефективність використання. Створено системну методологію розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення задач природокористування при зростанні об'єму виконуваних тематичних задач та удосконаленні космічних систем дистанційного зондування Землі (зростанні ризику надзвичайних ситуацій, розширення пошуку корисних копалин і вдосконалення параметрів космічних знімків ДЗЗ).

Національною академією наук України та Державним космічним агентством України Центр визначено головною організацією з комплексної розробки науково-методичних основ аерокосмічного зондування Землі для дослідження природних ресурсів і екологічного моніторингу. На базі Центру працює Наукова рада НАН України по вивченню природних ресурсів дистанційними методами та спеціалізована рада з присудження докторських і кандидатських наукових ступенів у галузі технічних та геологічних наук за спеціальністю «Дистанційні аерокосмічні дослідження».

Центр — перша в Україні наукова організація, яка свого часу була прийнята до Європейської асоціації лабораторій дистанційного зондування (EARSeL). Центр має розвинуті міжнародні

зв'язки та плідно співпрацює з Європейським космічним агентством (ESA), а також космічними агентствами та установами Росії, США, Німеччини, Франції, Угорщини, Польщі, Білорусі, зокрема в рамках програм GEOSS-GMES та ін.

Центром видано атласи «Україна з Космосу» та «Космос — Україні» комп'ютерно дешифрованих космознімків українсько-російського космічного апарата «Океан-О», українського супутника «Січ-1», підготовлено аналогічні матеріали зйомок супутником «Січ-2», в яких показана можливість їхнього використання для вирішення актуальних для України природо-ресурсних і природоохоронних завдань.

Центр неодноразово займав перші місця у Відділенні наук про Землю НАН України по кількості одержаних патентів.

Упровадження розроблених у Центрі новітніх супутникових технологій пошуків покладів вуглеводнів дозволило провести оцінку нафтогазоперспективності заданих замовниками 134 об'єктів Дніпровсько-Донецької западини та 64 об'єктів Азово-Чорноморського шельфу (в тому числі 18 — по Азовському і 46 — по Чорноморському шельфу). Рекомендації стосовно постановки пошуково-розвідувальних робіт на виявлених площах регулярно передаються ПАТ «Укрнафта», ДК «Укргазвидобування», НАК «Нафтогаз України».

Державним адміністраціям Києва і Херсона подано результати дешифрування космічних зображень з прогнозуванням розвитку сучасних екзогенних процесів у місті. До Генерального плану розвитку м. Києва до 2025 р. розроблені картографічні моделі розвитку підтоплення ґрунтовими водами території м. Києва масштабу 1:25 000—1:50 000. Міністерству з надзвичайних ситуацій України надано карту пожежонебезпечності лісів Чорнобильської зони відчуження. БАТ «Укрнафта» передані для впровадження карти «Джерела аномально високих концентрацій природного газу у приземному шарі атмосфери міст Борислав та Східниця».

Співробітникам Центру присуджено Державні премії України в галузі науки і техніки:

- за 2004 р. В. І. Ляльку (як співавтору) за цикл робіт під назвою «Наукові основи формування

ресурсів підземних вод як джерела якісного водопостачання та раціонального господарського водокористування».

- за 2005 р. О. Д. Федоровському, М. О. Попову та О. І. Сахацькому (як співавторам) за цикл робіт під назвою «Розв'язання проблем раціонального природокористування методами аерокосмічного зондування Землі та моделювання геодинамічних процесів».

Академік НАН України В. І. Лялько, член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський, професор М. О. Попов мають почесне звання заслуженого діяча науки і техніки України.

Перспективи розвитку наукових досліджень Центру пов'язані зі створенням єдиної теорії ДЗЗ, в основу якої мають бути покладені сучасні уявлення наук про Землю, теорія енергомасообміну в геосистемах, досягнення теорії систем; удосконаленням моделей фізичних процесів, що відбуваються на суходолі та на шельфі, в контексті досліджень нафтогазоперспективності територій; розробленням теоретико-методичних підходів, моделей, алгоритмів, демонстраційного програмного забезпечення та пілотних технологій комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень Землі і наземних даних, а також наданням наукових рекомендацій щодо впровадження цих розробок в практику; створенням системи глобального та регіонального космічного екологічного моніторингу, зокрема моніторингу екостану урбанізованих територій, аудиторського моніторингу балансу парникових газів для надійного обґрунтування та уточнення їхніх квот для різних країн та оцінки потенціальних можливостей продажу квот, зокрема Україною.

Результати досліджень Центру за 20-річний період його роботи знайшли своє відображення у близько 600 публікацій (статей, тез, патентів, монографій), в тому числі:

1. Космическая информация в геологии / Под ред. В. Г. Трифонова и др. — М.: Наука, 1983. — 536 с.
2. Аэрокосмические методы в геоэкологии / В. И. Лялько, Л. Д. Вульфсон, В. Ю. Жарый. — Киев: Наук. думка, 1992. — 206 с.
3. Україна з космосу (Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів): 2-ге вид. / Під

- ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. — Київ, 1999. — 34 с.
4. Космос — Україні (Атлас дешифрованих знімків території України з КА «Океан» та інших космічних апаратів) / Під ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. — Київ, 2001. — 106 с.
 5. Нові методи в аерокосмічному землезнавстві / Під ред. В. І. Лялька. — Київ, 1999. — 262 с.
 6. Інформатизація аерокосмічного землезнавства / Ред. С. О. Довгий, В. І. Лялько. — Київ: Наук. думка, 2001. — 606 с.
 7. Словник із дистанційного зондування Землі / Під ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: СМП «АВЕРС», 2004. — 170 с.
 8. Державний стандарт України ДСТУ 4220-2003 «Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять». — Київ: Держспоживстандарт України, 2003. — 18 с. — (За замовленням Держспоживстандарту України та НКАУ, 2003 р.).
 9. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — 358 с.
 10. Навчальний посібник «Аерокосмічні знімальні системи» / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. — Львів: «Львівська політехніка», 2010. — 292 с.
 11. Монографія (російською) «Изменения земных систем в Восточной Европе» / Ред. В. И. Лялько. — Киев: ПП «Фолиант». 2010. — 581 с.) за участю провідних фахівців ключових дослідницьких установ України, країн Європи (Міжнародний інститут прикладного системного аналізу — IIASA), а також США (Міжнародна програма з вивчення північної Євразії — NEESPI).
 12. Науково-методичний посібник «Аерокосмічні дослідження геологічного середовища» / А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович, В. Л. Приходько та ін. — Київ: Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Державна геологічна служба, 2010. — 246 с.
 13. Earth Systems Change over Eastern Europe / Coeditors P. Groisman, V. Lyalko. — K.: Akadempriodyka, 2012. — 488 p., 17 p. il.

Надійшла до редакції 04.04.12

V. I. Lyalko, M. O. Popov, O. D. Fedorovskyi, O. I. Levchyk

THE STATE ORGANIZATION «SCIENTIFIC CENTRE FOR AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE» (TO THE 20TH ANNIVERSARY OF THE FOUNDATION)

БЕРЕЗОВСЬКИЙ Вадим Якимович — завідувач відділу клінічної патофізіології Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, доктор медичних наук, професор, лауреат премії ім. О. О. Богомольця НАН України, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат державної премії України, кавалер ордена князя Ярослава Мудрого V ступеня, винахідник року НАН України, віце-президент Міжнародної Академії проблем гіпоксії. Автор 460 наукових статей, 10 монографій, 46 патентів і винаходів, 6 методичних рекомендацій МОЗ України. Куратор проблеми «Космічна медицина» Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — клінічна патофізіологія.

ВЕСЕЛЬСЬКИЙ Станіслав Павлович — старший науковий співробітник відділу загальної фізіології Інституту фізіології імені Петра Богача Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — ліпідний обмін у тканинах організму.

ВОЙЦЕХОВСЬКА Анна Дмитрівна — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

ГЕРАСИМЕНКО Світлана Володимирівна — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

ДОНЕЦЬ Володимир Володимирович — голова правління Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ, кандидат технічних наук. Державний повіритель спектрофотометричної апаратури.

Напрямок науки — спектрометрія, гіперспектрометрія, аерокосмічні мультимедійні гіперспектральні системи, підсупутникова валідація.

ЗАМОРСЬКА Тетяна Михайлівна — аспірант відділу клінічної патофізіології Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України.

Напрямок науки — мінеральний обмін та метаболічні зміни в кістковій тканині.

КАНЕВСЬКИЙ Леонід Броніславович — ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету.

Напрямок науки — наземні засоби космічної інфраструктури України.

КОВБАСЮК Сергій Валентинович — провідний науковий співробітник наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — наземні засоби космічної інфраструктури України

КОЗАК Павло Миколайович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

КОЧУБЕЙ Галина Сергіївна — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — механіка рідини, газу та плазми.

КРИШТАЛЬ Олександр Нектарійович — завідувач відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика, фізика Сонця, фізика плазми.

КРУЧИНЕНКО Віталій Григорович — провідний науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

ЛЕВЧИК Олена Іванівна — вчений секретар Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — біологія.

ЛІТОВКА Ірина Георгіївна — провідний науковий співробітник відділу клінічної патофізіології Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник. Автор 124 наукових робіт і монографій.

Напрям науки — мінеральний обмін та метаболічні зміни в кістковій тканині.

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

Напрям науки — гідрогеологія, дистанційне зондування земної поверхні.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — Головний конструктор-начальник КБ космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — ракетно-космічна техніка.

МУРАВСЬКИЙ Леонід Ігорович — завідувач відділу оптико-електронних інформаційних систем Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, нагороджений Грамотою Верховної Ради України.

Напрям науки — оптична і оптико-цифрова обробка інформації, розпізнавання образів, інтерферометрія і спекл-інтерферометрія поверхні, екологічно орієнтовані геоінформаційні системи, аерокосмічні методи і засоби екологічного моніторингу.

ПИСЬМЕННИЙ Микола Іванович — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора з наукової роботи Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — аерокосмічні системи дистанційних досліджень Землі.

РОЖИЛО Олександр Олександрович — провідний інженер Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика метеорних явищ.

СМІЛА Тетяна Григорівна — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Напрям науки — динаміка розрідженого газу.

СУМАРУК Петро Васильович — старший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Націо-

нальної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — геомагнетизм.

СУМАРУК Тарас Петрович — молодший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України.

Напрям науки — геомагнетизм.

СУМАРУК Юрій Петрович — співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України.

Напрям науки — геомагнетизм.

ТАРАНУХА Юрій Григорович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика метеорних явищ.

ТОКМАК Микола Анатолійович — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

ФЕДОРОВСЬКИЙ Олександр Дмитрович — член-кореспондент Національної академії наук України, завідувач відділу системного аналізу державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — гідрофізика, дистанційне дослідження Землі.

ХОРОШИЛОВ Сергій Вікторович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів.

ШУВАЛОВ Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного 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.

ЯНКО Роман Васильович — молодший науковий співробітник відділу клінічної патофізіології Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — обмін речовин у тканинах організму.