



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

Том 24
3(112)
2018

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

ДЕРЖАВНЕ
КОСМІЧНЕ
АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ ✦ ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. ✦ ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК ✦ КИЇВ



ЗМІСТ

Космічні енергетика і двигуни

Пироженко А. В., Мищенко А. В. Малая экспериментальная электродинамическая космическая тросовая система. Электрическая модель 3

Космічне приладобудування

Зализовский А. В., Кащеев А. С., Кащеев С. Б., Колосков А. В., Лисаченко В. Н., Пазнухов В. В., Пикублик И. И., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Макет портативного когерентного ионозонда 10

Синявський І. І., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Міліневський Г. П., Кошман Г. В. Мультиспектральний іміджер-поляриметр космічного проекту «Аерозоль-УА» 23

Дудник А. В., Лазарев И. В., Курбатов Е. В., Ковалинский М., Подгурский П., Сыцисловский Д. Целесообразность ориентирования осей кристалла *n*-терфенила в сцинтилляционном детекторе монитора заряженных частиц солнечного рентгеновского спектрофотометра ChemiX 33

Космічна й атмосферна фізика

Грицай А. В., Міліневський Г. П. Загальний вміст озону над станцією Київ-Голосіїв за наземними та супутниковими вимірюваннями у 2010 — 2015 рр. 40

CONTENTS

Space Energy, Power and Propulsion

Pirozhenko A. V., Mischenko A. V. Small experimental electrodynamic space tether system. Electrical model 3

Space Instruments

Zalizovski A. V., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B., Koloskov A. V., Lisachenko V. N., Paznukhov V. V., Pikulik I. I., Sopin A. A., Yampolski Yu. M. A prototype of a portable coherent ionosonde 10

Syniavskyi I. I., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Milinevsky G. P., Koshman G. V. Multispectral imager-polarimeter of the space project Aerosol-UA 23

Dudnik O. V., Lazarev I. V., Kurbatov E. V., Kowaliński M., Podgórski P., Ścisłowski D. Advisability of the axes orientation in *p*-terphenyl crystal of scintillation detector of the charged particle monitor in ChemiX solar X-ray spectrophotometer 33

Space and Atmospheric Physics

Grytsai A. V., Milinevsky G. P. Total ozone content over Kyiv-Goloseyev station by ground-based and satellite measurements in 2010—2015 40

<i>Козак Л., Петренко Б., Кронберг О., Прохоренков А., Григоренко О., Черемних О., Черемних С., Луї Е., Козак П., Кунделько І. Турбулентні процеси у хвості магнітосфери Землі: статистичний та спектральний аналіз</i>	55	<i>Kozak L., Petrenko B., Kronberg E., Porokhorenkov A., Grigorenko E., Cheremnyh O., Cheremnyh S., Lui A., Kozak P., Kundelko I. Turbulent processes in the Earth's magnetotail: Statistical and spectral analysis</i>	55
Дослідження Землі з космосу		Study of the Earth from Space	
<i>Ткаченко А. І. Два алгоритма привязки наземных объектов по космическим снимкам</i>	69	<i>Tkachenko A. I. Two algorithms for the geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots</i>	69
Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень		Social Sciences in Space Exploration	
<i>Малишева Н. Р., Гурова А. М., Михайський О. Є. Еколого-правовий статус людини в космосі: порівняльний аналіз</i>	75	<i>Malysheva N. R., Hurova A. M., Mykhaiskyi A. Y. Ecological and legal status of a human being in outer space: Comparative analysis</i>	75
Наші автори	83	Our authors	83

На першій сторінці обкладинки — загальний вміст озону за даними OMI (Ozone Monitoring Instrument) для 16 травня 2016 р. — див. статтю А. В. Грицай, Г. П. Міліневський «Загальний вміст озону над станцією Київ-Голосіїв за наземними та супутниковими вимірюваннями у 2010—2015 pp.»

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук

У підготовці видання взяло участь Українське регіональне відділення Міжнародної академії астронавтики

Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua
Веб-сайт: space-scitechnjournal.org.ua

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

Підписано до друку 09.07.2018. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 8,82.
Обл.-вид. арк. 9,26. Тираж 101 прим. Зам. № 5324.

Оригінал-макет виготовлено і тираж віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01004

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

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.003>

УДК 629.788

А. В. Пироженко, А. В. Мищенко

Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Днепр, Украина

МАЛАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ТРОСОВАЯ СИСТЕМА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Предложена электрическая модель пассивной электродинамической космической тросовой системы (ЭДКТС), описывающая ее взаимодействие с магнитосферой и ионосферой Земли на низких околоземных орбитах, распределение потенциала и токов в системе. Рассматривается ЭДКТС двух тел, соединенных токопроводящим тросом. В качестве троса рассматривается либо цилиндрическая нить, либо лента. Модель основывается на зондовой теории и равенстве электронного и ионного токов, собираемых системой в ионосферной плазме, и позволяет рассчитывать параметры ЭДКТС, обеспечивающие существование анодной и катодной частей системы для выбранной орбиты, а также прогнозировать напряжения и токи в частях системы. Предлагаемая модель позволяет более просто проводить расчеты и оценки эффектов взаимодействия системы с плазмой, а также учитывать ряд дополнительных факторов, которые могут вносить значительные поправки в работу системы..

Ключевые слова: электродинамическая космическая тросовая система, система увода космических аппаратов, электрическая модель.

Интерес к экспериментальным исследованиям с электродинамическими космическими тросовыми системами (ЭДКТС) на низких околоземных орбитах (НОО) сохраняется уже в течение десятков лет. Этот интерес обусловлен перспективностью использования ЭДКТС для транспортных операций и для увода космического мусора. Снижение стоимости таких экспериментов связано с использованием малых тросовых систем. Использование микроспутников, и в особенности технологии «CubeSat», позволяет существенно сократить расходы на экспериментальные исследования. Во многих странах разрабатываются проекты малых ЭДКТС на микроспутниках [5–7, 11]. Проведено около десятка экспериментов, однако неполное развертывание

тросового соединения во всех этих запусках не позволило провести требуемые измерения.

Ниже предложена электрическая модель пассивной ЭДКТС, т. е. такой ЭДКТС, в которой не предусмотрены дополнительные контакторы с плазмой. Эта модель описывает взаимодействие ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли на НОО, распределение потенциала и токов в системе. В отличие от известной модели [3, 8] предлагаемая модель позволяет более просто проводить расчеты и оценки эффектов такого взаимодействия для тросового соединения, а также учитывать дополнительные факторы, которые могут вносить значительные поправки в работу системы и в измерения.

Рассматривается ЭДКТС двух тел, соединенных токопроводящим тросом. В качестве троса рассматривается либо цилиндрическая нить,

© А. В. ПИРОЖЕНКО, А. В. МИЩЕНКО, 2018

либо лента. Система движется по почти круговой НОО. В расчетах, результаты которых приведены в статье, предполагается, что длина троса равна 1000 м, материал системы — алюминий, орбита близка к экваториальной. Концентрации заряженных частиц в ионосфере принимаются равными средней для данной высоты концентрации при средней солнечной активности.

Распределение потенциала вдоль ЭДКТС. Будем отсчитывать координату x линии троса от нижнего тела. Тогда напряжение на участках ЭДКТС можно описать с помощью дифференциального закона Ома [8]

$$\frac{dU}{dx} = E_{\text{л}} - \frac{I}{\sigma A_t}, \quad (1)$$

где U — электрический потенциал,

$$E_{\text{л}} = (\mathbf{F}_{\text{л}} \cdot \mathbf{e}_r) / q \approx [\mathbf{V}_{\text{орб}} \times \mathbf{B}] \cdot \mathbf{e}_r$$

— напряженность, обусловленная силой Лоренца $\mathbf{F}_{\text{л}}$, действующей на заряд q , и вызванная орбитальным движением системы в магнитном поле Земли, $\mathbf{e}_r$ — единичный вектор, направленный вдоль линии троса от отрицательно заряженного тела к положительно заряженному (при прямом вращении ЭДКТС с вращением Земли направлен от нижнего тела к верхнему), $\mathbf{V}_{\text{орб}}$ — скорость движения центра масс ЭДКТС в инерциальной системе координат, связанной с Землей [8], $\mathbf{B}$ — индукция магнитного поля Земли, $I = I(x)$ — ток в данной точке троса, σ — удельная электрическая проводимость материала троса, A_t — площадь поперечного сечения проводника (в случае цилиндрического троса $A_t = \pi r_t^2 = p_t^2 / (4\pi)$, в случае ленты $A_t = d_s s = p_s / 2$, где d_t — ширина ленты, s — толщина ленты, p_t — периметр поперечного сечения троса).

Во многих случаях для ЭДКТС, в которых не предусмотрены дополнительные контакторы с плазмой, падение напряжения в тросе (второй член в выражении (1)) пренебрежимо мало влияет на изменение потенциала в системе. Это связано с большой удельной проводимостью материала троса и относительно небольшими токами в системе. Так, для рассматриваемой 1000-м системы ожидаемый ток составит приблизительно 5 мА, а удельная электрическая проводимость

алюминия $\sigma = 3.5 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Поэтому уравнение (1) во многих случаях с большой точностью можно упростить и записать в виде

$$\frac{dU}{dx} = [\mathbf{V}_{\text{орб}} \times \mathbf{B}] \cdot \mathbf{e}_r. \quad (2)$$

Расчеты показывают, что замена (1) на (2) вносит погрешность 1–2 % в определение потенциала системы для пассивных ЭДКТС на НОО даже при их протяженности до 25 км.

Таким образом, можно считать, что электрический потенциал вдоль линии троса изменяется линейно. При этом предполагается, что изменения магнитного поля для разных частей системы и изменения скоростей частей ЭДКТС относительно магнитного поля в сравнении с орбитальной скоростью системы пренебрежимо малы.

Примем, что потенциал ионосферной плазмы равен нулю. Предположим, что на тросе имеется точка нулевого потенциала, разделяющая положительно и отрицательно заряженные относительно плазмы участки системы. Тогда уравнения (1) и (2) определяют потенциал точек системы относительно плазмы.

Обозначим координату точки нулевого потенциала на линии троса a , т. е. $U(a) = 0$ (интервал $[0, a)$ заряжен отрицательно, (a, l) — положительно, l — длина троса). Эта точка определяется равенством токов, собираемых из плазмы отрицательно и положительно заряженными участками системы. Следовательно, для расчета взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой и магнитосферой нужно определить токи, поступающие на положительно и отрицательно заряженные части системы в предположении линейного вдоль линии троса изменения их потенциала относительно плазмы. На основе равенства токов, поступающих из плазмы на разноименно заряженные части системы, нужно определить расположение точки нулевого потенциала на тросе, и лишь затем рассчитать потенциал и ток системы в различных ее частях.

Токи анодной и катодной частей системы. В этом подразделе выписаны соотношения для определения собирания токов из плазмы различными частями ЭДКТС. Эти соотношения получены на основе зондовой теории разреженной плазмы [1, 2].

Отметим, что тепловая скорость электронов значительно превосходит орбитальную скорость системы ($V_e \gg V_{орб}$), и для расчета электронного тока на положительно заряженные части ЭДКТС применима теория неподвижного зонда. Вместе с тем орбитальная скорость в несколько раз превышает тепловую скорость ионов ($V_{орб} \gg V_i$), поэтому для расчета ионного тока используется теория для зонда, находящегося в движущейся плазме [7].

Поток зарядов на трос рассчитывается по зондовой теории для цилиндров для орбитально ограниченного тока (ООТ) [3].

Ток электронов на положительно заряженную часть троса определяется формулой [5, 7]

$$I_{e1} = p_i j_{oe} \int_a^l i_{e1}^- dx, \quad (3)$$

где p_i — периметр поперечного сечения троса (в случае цилиндрического троса $p_i = 2\pi r_i$, в случае ленты $p_i \approx 2d_i$),

$$i_{e1}^- = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eU}{kT_e}} + 1$$

— безразмерный электронный ООТ,

$$j_{oe} = en_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}$$

— плотность теплового электронного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток электронов), n_o — концентрация заряженных частиц в окружающей невозмущенной ионосферной плазме, k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов окружающей плазмы, m_e , e — масса и заряд электрона.

Ток ионов на отрицательно заряженную часть троса определяется формулой [5, 7]

$$I_{i2} = j_{oi} \frac{p_i}{\pi} \int_0^a i_{i2}^+ dx, \quad (4)$$

где

$$j_{oi} = en_o \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi m_i}}$$

— плотность теплового ионного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток ионов), T_i , m_i — температура и масса ионов окружающей ионосферной плазмы,

$$i_2^+ = \frac{2}{\sqrt{\pi}} S_i \sqrt{1 + \frac{eU}{kT_i S_i^2}}$$

— безразмерный ионный ток,

$$S_i = \sqrt{\frac{m_i V_{орб}^2}{2kT_i}}$$

— скоростное отношение.

Соотношения ООТ (3), (4) справедливы для расчета собираемого тока цилиндрическим тросом, радиус поперечного сечения которого меньше или равен дебаевскому радиусу $r_i \leq \lambda_D$, или для тонкой ленты, толщина которой $h_i \ll \lambda_D$ и ширина $d_i \leq 4\lambda_D$ [10]. Если радиус троса больше, то для расчета тока при использовании соотношений ООТ необходимо вводить поправочные коэффициенты [9].

Потоки электронов на катодную и ионов на анодную части троса рассчитываются как токи отталкивающих частиц [7].

Ток электронов на катодную часть троса определяется формулой

$$I_{e2} = p_i j_{oe} \int_0^a \exp\left(-\frac{eU}{kT_e}\right) dx. \quad (5)$$

Токи ионов на анодную часть троса определяется формулой

$$I_{i2} = p_i j_{oi} \int_0^a \exp\left(-\frac{eU}{kT_e}\right) dx. \quad (6)$$

Расчет тока на концевые тела ЭДКТС основывается на моделях для больших сферических зондов [2, 9]. При этом концевые тела будем моделировать некоторыми эквивалентными сферами радиуса R_o ($R_o \gg \lambda_D$).

Собирание электронного тока *положительно заряженным телом* при не очень высоких его потенциалах определяется формулой

$$I_{es1} = k_s I_{oe}, \quad (7)$$

где $I_{oe} = en_o R_o^2 \sqrt{8\pi kT/m_e}$ — электронный ток в отсутствие электрического поля, R_o — радиус сферического зонда, k_s — коэффициент усиления тока, значения которого для различных потенциалов даны в [7].

Во многих случаях для рассматриваемых ЭДКТС потенциал положительно заряженного тела таков, что ток электронов достигает насыщения, и его величина не зависит от потенциала.

Ток насыщения в 1.47 раз превышает ток I_{oe} в отсутствие поля [7]:

$$I_{es2} = 1.47 I_{oe}. \quad (8)$$

Для собирания электронов при очень высоких потенциалах ($eU/(kT_e) \geq (R_o/\lambda_D)^{4/3}$) применяется теория для тока, ограниченного слоем. Наиболее известные теории для расчета тока, ограниченного слоем — теория Альперта — Лема и теория Паркера — Мерфи. Обе эти теории проверялись в орбитальном эксперименте TSS-1R. Теория Паркера — Мерфи, в отличие от теории Альперта — Лема, учитывает влияние замагниченности плазмы на собирание тока, однако в эксперименте TSS-1R она не подтвердилась. Полученные экспериментальные данные лучше сошлись с теорией Альперта — Лема. Собираемый ток в этой теории определяется соотношением [10]:

$$I_{es3} = I_{AL} = I_{oe} H(\Phi_{AL}), \quad (9)$$

где

$$\Phi_{AL} = \frac{eU}{kT_e} \left(\frac{\lambda_D}{R_o} \right)^{4/3} = \Phi_w \left(\frac{\lambda_D}{R_o} \right)^{4/3}$$

— безразмерный потенциал в теории Альперта — Лема, $H(\Phi_{AL})$ — безразмерная функция тока, ограниченного слоем.

Вид функции $H(\Phi_{AL})$ был уточнен по результатам эксперимента TSS-1R, после чего экспериментальные данные хорошо сошлись с теоретическими:

$$H(i_{AL}) = 4.5(\Phi_{AL})^{1/2}. \quad (10)$$

В эксперименте TSS-1R максимальный безразмерный потенциал Альперта — Лема был равен $\Phi_{AL} \approx 10$. Как утверждается в [9], для безразмерных потенциалов, лежащих в диапазоне $\Phi_{AL} = 0.25 \dots 10$, аппроксимация (10) дает погрешность менее 10 %. Использование (10) для расчета тока при потенциалах $\Phi_{AL} > 10$ не исключается, но требует экспериментальной проверки.

Расчеты показывают, что для рассматриваемых ЭДКТС в ряде случаев в зависимости от параметров системы и ее орбиты нужно использовать модели (9), (10) теории для тока, ограниченного слоем.

Собирание тока ионов отрицательно заряженным телом является одним из наиболее трудных

для моделирования процессов и наименее экспериментально проверенно. Поскольку орбитальная скорость ЭДКТС в несколько раз превышает скорость ионов, то используется теория для зонда, находящегося в движущейся плазме [7]. Эта теория отмечает значительные несимметричности возмущенной зоны плазмы, которые существенно затрудняют решение задачи [7].

Еще одной особенностью собирания ионного тока отрицательно заряженным спутником является неизотермичность плазмы. Для ионосферной плазмы на высотах $h = 400 \dots 800$ м отношение T_i/T_e равно $0.57 \dots 0.73$. Величина ионного тока на большой зонд при $T_e > T_i$ отличается от величины тока в изотермической плазме [2] и определяется не температурой ионов, а температурой электронов.

Поскольку во многих случаях потенциал отрицательно заряженного тела очень высок ($eU/(kT_e) \geq (R_o/\lambda_D)^{4/3}$), то для моделирования собирания ионов этим телом, как и в случае с электронами, будем использовать модели теории Альперта — Лема [9] для тока, ограниченного слоем. Ионный ток на отрицательно заряженное тело будем описывать выражением

$$I_{is} = I_{AL} = I_{oi} H(\Phi_{AL}), \quad (11)$$

где

$$I_{oi} = 2\pi R_o^2 S_i^2 e n_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_i}}$$

— ионный ток в отсутствие электрического поля.

При этом считаем, что вид функции $H(\Phi_{AL})$ для ионного тока такой же, как и в случае с электронным током (10).

Отметим, что поскольку коэффициент функции $H(\Phi_{AL})$ был найден эмпирически для электронного тока, то для ионного тока он может быть иным. Соотношения (11), (10) нуждаются в экспериментальной проверке.

Значимый вклад в баланс тока ЭДКТС может вносить фототок. Поскольку фототок пропорционален площади освещаемой поверхности, то вклад концевых тел в его величину для рассматриваемых ЭДКТС пренебрежимо мал. Также незначителен будет фототок с положительно заряженной части троса, поскольку, во-первых,

она достаточно короткая, и, во-вторых, при положительном потенциале, большем величины запирающей разности потенциалов ($\varphi \approx 2$ В), фотоэлектроны, выбиваемые фотонами, будут сразу же возвращены на трос электрическим полем.

Ток электронов с катодной части троса будем описывать соотношением

$$I_{\phi} = \frac{p_t}{2} \int_0^a j_{\phi} dx = \frac{p_t}{2} (l-a) j_{\phi}, \quad (12)$$

где j_{ϕ} — плотность фотоэлектронного тока при отрицательном потенциале поверхности.

Поскольку интенсивность солнечного излучения на орбите почти постоянна, то величина фототока определяется лишь материалом поверхности троса и затененностью этой поверхности. Основываясь на измерениях, выполненных спутником «Эксплорер-VIII» на НОО, плотность фотоэлектронного тока с алюминиевой поверхности при ее отрицательном потенциале равна $j_{\phi} = 4.8 \cdot 10^{-9}$ А/см² [1, 4].

Координата нулевого потенциала определяется балансом электронного и ионного токов, поступающих на ЭДКТС. В рамках модели собирания тока (3)–(12) можно записать выражение для определения координаты нулевого потенциала:

$$\begin{aligned} I_{e1}(a) + I_{es}(a)_{\{1,2\}} - I_{i1}(a) = \\ = I_{i2}(a) + I_{\phi}(a) + I_{is}(a) - I_{e2}(a). \end{aligned}$$

В это выражение входят параметры орбиты, окружающей ионосферы и параметры самой ЭДКТС. Координата нулевого потенциала определяет длины анодной и катодной частей системы.

Примеры расчетов для экспериментальной ЭДКТС и основная особенность взаимодействия системы с магнитосферой и ионосферой. Проведем оценки собираемого тока для малых ЭДКТС протяженностью 1000 м с радиусами концевых тел $R_0 = 10$ см. Будем рассматривать два вида систем: с цилиндрическим тросом ($r_t = 3$ мм) и с лентой ($d_t = 2$ см).

Максимальные токи (в точке нулевого потенциала) в ЭДКТС с тросом составляют: 27 мА для дневной и 1.6 мА для ночной частей орбиты высотой 300 км соответственно, 4.1 и 1.5 мА для орбиты высотой 650 км.

Максимальные токи в ЭДКТС с лентой составляют: 50 и 3.3 мА для орбиты высотой 300 км, 8.4 и 3.0 мА для орбиты высотой 650 км.

Основной особенностью взаимодействия рассматриваемой ЭДКТС с ионосферной плазмой является сравнительно короткая положительно заряженная ее часть. Расчеты показывают, что при произвольных длинах троса положительно заряженная часть не превосходит 2 % всей длины.

Это происходит вследствие того, что масса ионов значительно превышает массу электронов. При примерно равных энергиях скорость электронов почти на порядок больше скорости ионов и в несколько раз превышает орбитальную скорость. С учетом направленности потока ионов хаотический ток ионов на цилиндрический трос в $\sqrt{m_e / (\pi m_i)}$ раз меньше электронного тока. Для средней массы ионов, находящихся на орбите высотой 600 км, это отношение равно $\sqrt{m_e / (\pi m_i)} \approx 3.45 \cdot 10^{-3}$.

Длина положительной части ЭДКТС зависит от многих факторов, в том числе от параметров троса (его длины и площади поперечного сечения) и наклона орбиты к магнитному экватору. Вполне возможным является случай, когда в системе нет положительно заряженной части, и потенциал всех ее частей относительно окружающей плазмы отрицателен. В этом случае ток в системе будет крайне мал. Представляется, что экспериментальные исследования в таких случаях теряют свой смысл. Расчеты показывают, что для успешного проведения эксперимента длина троса должна превосходить 400 м даже для низко наклоненных орбит.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель пассивной ЭДКТС, описывающая ее взаимодействие с магнитосферой и ионосферой Земли на НОО, распределение потенциала и токов в системе. В отличие от известной модели [3, 8] предлагаемая модель позволяет проводить расчеты на основе решения алгебраического, а не дифференциального уравнения, а также позволяет учитывать ряд дополнительных факторов, которые могут вносить значительные поправки в работу системы и в измерения.

2. Модель позволяет рассчитывать параметры ЭДКТС для проведения орбитального эксперимента, обеспечивающие существование анодной и катодной части системы для выбранной орбиты, а также прогнозировать напряжения и токи в частях системы.

3. Модель удобна для расчета динамики ЭДКТС с учетом других внешних воздействий.

Авторы выражают благодарность профессору В. А. Шувалову за идеи и ценные советы, положенные в основу модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойд Р. Зонды Ленгмюра на космическом корабле // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 506—538.
2. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969. — 290 с.
3. Ahedo E., Sanmartin J. R. Analysis of bare-tether systems for deorbiting low-Earth-orbit satellites // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2002. — **39**, N 2. — P. 198—205.
4. Chu C. K., Gross R. A. Alfvén waves and induction rag on long cylindrical satellites // *AIAA J.* — 1966. — **4**, N 12. — P. 2209—2214.
5. HTV-KITE Experiment. — URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
6. Johnson L., Fujii H. A., Sanmartin J. R. Electrodynamic Propulsion System Tether Experiment (T-REX) [Электронный ресурс] // NASA Technical Reports Server (NTRS). — 2010. — 20100024214. — 30 p. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
7. Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE). — URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
8. Sanmartin J. R., Estes R. D. Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime // *J. Phys. Plasmas*. — 2000. — **7**, N 10. — P. 4320—4325.
9. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C. Spherical collectors versus bare tethers for drag, thrust, and power generation // *AIAA 2005-4434 — 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 — 13 July 2005, Tucson, Arizona* — P. 1—7.
10. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M. Electrodynamic tether applications and constraints // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2010. — **47**, N 3. — P. 142 — 156.

11. Tether Electrodynamic Propulsion CubeSat Experiment (TEPCE). — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_tether_missions#CubeSat_technology.

Стаття надійшла до редакції 25.10.17

REFERENCES

1. Boyd R. L. F. Zondi Lengmura na kosmicheskom korable [Langmuir probes on a spacecraft]. Methods of plasma research. Moskva : Mir (1971) [in Russian].
2. Kozlov O. V. Elektricheskiy zond v plazme [Electrical probe in plasma]. Moskva.: Atomizdat (1969) [in Russian].
3. Ahedo E., Sanmartin J. R. Analysis of Bare-Tether Systems for Deorbiting Low-Earth-Orbit Satellites. *J. Spacecraft and Rockets*. **39** (2). 198—205 (2002).
4. Chu C. K., Gross R. A. Alfvén waves and induction rag on long cylindrical satellites. *AIAA J.* **4** (12). 2209—2214 (1966).
5. HTV-KITE Experiment. *spaceflight101.com*. — URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
6. Johnson L., Fujii H.A., Sanmartin J. R. Electrodynamic Propulsion System Tether Experiment (T-REX) // NASA Technical Reports Server (NTRS). — 20100024214. — 30 p. (2010). — URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
7. Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE). digitalcommons.usu.edu. — URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
8. Sanmartin J. R., Estes R. D. Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime. *J. Physics of Plasmas*. **7** (10). 4320—4325 (2000).
9. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C. Spherical Collectors Versus Bare Tethers for Drag, Thrust, and Power Generation // *AIAA 2005-4434 - 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 — 13 July 2005, Tucson, Arizona* — P. 1—7.
10. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M. Electrodynamic tether applications and constraints. *J. Spacecraft and Rockets*. **47** (3). 142—156 (2010).
11. Tether Electrodynamic Propulsion CubeSat Experiment (TEPCE). en.wikipedia.org. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_tether_missions#CubeSat_technology.

Received 25.10.17

О. В. Пироженко, О. В. Мищенко

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Дніпро, Україна

МАЛА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА КОСМІЧНА ТРОСОВА СИСТЕМА. ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ

Интерес до експериментальних досліджень з електродинамічними космічними тросовими системами (ЕДКТС) на низьких навколоземних орбітах (ННО) зберігається вже протягом декількох десятиків років. Цей інтерес обумовлений перспективністю використання ЕДКТС для транспортних операцій та відведення космічного сміття. Зниження вартості таких експериментів пов'язане з використанням малих тросових систем. Метою статті є розробка електричної моделі пасивної ЕДКТС, тобто такої ЕДКТС, в якій не передбачені додаткові контактори з плазмою. Дана модель ґрунтується на зондовій теорії та рівності електронного та іонного струмів, що збираються системою в іоносферній плазмі. Модель дозволяє розраховувати параметри експериментальної ЕДКТС, що забезпечують існування анодної та катодної частин системи для обраної орбіти, а також прогнозувати напругу та струми в частинах системи. Розглядається ЕДКТС двох тіл, з'єднаних струмопровідним тросом. Як трос розглядається або циліндрична нитка, або стрічка. Потік зарядів на трос розраховується за зондовою теорією для циліндрів для орбітально обмеженого струму. Розрахунок струму на кінцеві тіла ЕДКТС ґрунтується на моделях для великих сферичних зондів. Збирання струму іонів негативно зарядженим тілом є одним з найбільш складних для моделювання процесів і найменш експериментально перевіреним. Для його розрахунку в доповіді використано модель Альперта—Лема для струму, обмеженого шаром. Відзначимо, що оскільки коефіцієнти цієї теорії були знайдені емпірично для електронного струму, то для іонного струму вони можуть бути іншими і вимагають експериментальної перевірки. Основною особливістю взаємодії розглянутої ЕДКТС з іоносферною плазмою є порівняно коротка її анодна частина. Розрахунки показують, що при будь-яких довжинах троса позитивно заряджена частина не перевищує 2 % всієї довжини. На відміну від попередньої моделі, запропонована модель дозволяє простіше проводити розрахунки та оцінки ефектів взаємодії системи з плазмою, а також враховувати ряд додаткових факторів, які можуть вносити значні поправки в роботу системи.

Ключові слова: електродинамічна космічна тросова система, система відведення космічних апаратів, електрична модель.

A. V. Pirozhenko, A. V. Mischenko

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

SMALL EXPERIMENTAL ELECTRODYNAMIC SPACE TETHER SYSTEM. ELECTRICAL MODEL

For some decades, the scientists preserve an interest in the experimental research with electrodynamic space tethered system (EDSTS) in low Earth orbits (LEO). This interest is caused by the prospects of the EDSTS's use for transport operations and for space debris deorbit. The cost reduction of such experiments is associated with the small tether system's applying. The aim of this paper is to describe the electric model of passive EDSTS, in which additional contactors with plasma are not provided. The model is based on the probe theory and the equality of the electron and ion currents collected by the system in the ionospheric plasma. Model makes possible to calculate the EDSTS parameters ensuring the existence of the anodic and cathodic of the system parts for the selected orbit, as well as predicting the voltages and currents in the parts of the system. We examine the EDSTS of two bodies connected by a conductive cable, where either a cylindrical tether or a tape is considered as a cable. The flow of charges on the tether was calculated for the orbital-motion-limited regime of cylindrical Langmuir probes. The calculation of the current values on the end bodies of EDSTS is based on the models for large spherical probes. The collection of the ion current by a negatively charged body is one of the most difficult procedures to model processes and is the least experimentally verified. To calculate it, we used the Alpert-Lem model for a current limited by layer. We note that, since the coefficients of this theory for the electron current were found empirically, they may be different for the ion current and need experimental verification. The main feature of the interaction of the considered EDSTS with the ionospheric plasma is its relatively short anode part. Calculations show that the positively charged part for arbitrary tether lengths does not exceed 2 % of the total length. Unlike the previously known model, the proposed model allows us to simplify calculations and estimates of the effects of system interaction with plasma as well as to take into account a number of additional factors that can make significant corrections to the system operation.

Keywords: electrodynamics space tethered system, spacecraft removal system, electrical model.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010>

УДК 550.385.37; 550.388

А. В. Зализовский¹, А. С. Кашеев^{1,2}, С. Б. Кашеев¹, А. В. Колосков¹,
В. Н. Лисаченко¹, В. В. Пазнухов³, И. И. Пикулик¹, А. А. Сопин¹, Ю. М. Ямпольский¹

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

² Международный центр теоретической физики имени Абдус Салама, Триест, Италия

³ Исследовательский институт при Бостон колледже, штат Массачусетс, США

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

В Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины совместно с Международным центром теоретической физики имени Абдус Салама разработан экономичный портативный когерентный ионозонд на базе технологии программного радио. Первые лабораторные и полевые испытания нового ионозонда были проведены в Украине. В апреле 2017 г. система была введена в постоянную эксплуатацию на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский». Описаны принципы построения ионозонда на уровне функциональной схемы, приведены его основные характеристики и примеры вертикального зондирования ионосферы в Украине и Антарктике. В качестве демонстрации успешного испытания ионозонда представлены ионограммы вертикального зондирования, а также суточные высотные зависимости плазменных частот, доплеровских смещений частоты и интенсивностей зондирующих сигналов. Низкая цена и простота в обслуживании разработанного ионозонда может позволить в будущем установить значительное число систем, обеспечивающих высокое пространственное разрешение, недоступное ни в одной из работающих на сегодня сетей ионозондов.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, когерентное ВЧ-зондирование.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема исследования ионосферы возникла в начале 20-го века с момента предсказания А. Хэвисайдом и О. Кеннели формирования ионизированного слоя на высотах больше 100 км в верхней атмосфере. Впервые экспериментально ее существование в 1926 г. подтвердил профессор Э. Апплетон. По существу это были первые в мире радиолокационные эксперименты. В этом же году Г. Брейт и М. Тьюве использовали импульсную технику измерения высоты отражения пробных сигналов от разных ионосферных сло-

ев в зависимости от частоты излучающего передатчика. Принято считать, что именно с этого времени началось развитие методов радиодиагностики ионосферы [6]. Следует отметить, что за открытие ионосферы в 1947 г. Э. Апплетон был удостоен Нобелевской премии по физике. Поскольку собственные плазменные частоты наиболее интенсивного и протяженного по высоте F-слоя варьируют от единиц до десятка мегагерц, оптимальным для радиозондирования ионосферы является высокочастотный (ВЧ) диапазон. Самый распространенный метод диагностики носит название вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ), а установки для его реализации называются ионозондами. Ионозонды представляют собой классические радары, регистрирующие время задержки сигналов, отраженных от

© А. В. ЗАЛИЗОВСКИЙ, А. С. КАШЕЕВ, С. Б. КАШЕЕВ,
А. В. КОЛОСКОВ, В. Н. ЛИСАЧЕНКО, В. В. ПАЗНУХОВ,
И. И. ПИКУЛИК, А. А. СОПИН, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, 2018

ионосферы, в зависимости от несущей частоты излучения.

Почти за вековую историю ионозондов было создано множество их модификаций, использующих различные виды приемно-передающих устройств, разные типы модуляции, обработки и визуализации данных, однако основная информационная цель осталась неизменной. Основным результатом метода ВЗИ является высотно-частотная характеристика (ВЧХ), или ионограмма, представляющая собой частотную зависимость действующей высоты отражения пробного сигнала от ионосферы. Развитие современных высокостабильных когерентных приемно-передающих устройств и компьютерных систем обработки радиолокационных данных, кроме ВЧХ позволяет восстанавливать доплеровские смещения частоты отраженных сигналов, и следовательно, оценивать вертикальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы. Пространственное разнесение приемных позиций дает возможность измерять отклонение направления прихода пробного сигнала от ожидаемого и оценивать величину горизонтальных градиентов электронной концентрации. На сегодня наиболее современным и распространенным ионозондом является «дигизонд» DPS4D (Digisonde-Portable-Sounder-4D) [12], разработанный под руководством профессора Б. Райниша в Центре атмосферных исследований Массачусетского университета (г. Лоуэлл, США). В настоящее время на земном шаре работает сеть, включающая более ста «дигизондов», объединенных в Глобальную ионосферную радиообсерваторию — GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory) [13]. Несмотря на такую, казалось бы, развитую сеть станций ВЗИ, для многих научных и прикладных задач получаемой сегодня ионосферной информации недостаточно. Прежде всего это связано с ограниченным пространственно-временным разрешением данных. Станции GIRO на земном шаре расположены крайне неравномерно, характерный пространственный разнос между ними варьирует от сотен до нескольких тысяч километров. Глобальные ионосферные карты, представляемые этой виртуальной обсерваторией, «сглажены» сплайно-

выми функциям с грубым пространственным разрешением. Стандартный темп съема ионограмм составляет 15 мин. Поэтому имеющаяся ионосферная информация применима только для «медленных» и крупномасштабных изменений, таких как регулярные сезонные и суточные вариации плазменных характеристик либо глобальные возмущения. Для многочисленных научных и прикладных задач требуется либо еще более разветвленная мировая сеть, либо региональные системы ионосферного зондирования.

На сегодняшний день на территории Украины нет регулярно работающей станции ВЗИ. Исследовательские установки, имеющиеся на обсерваториях Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина и Института ионосферы Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, морально и физически устарели и не могут быть использованы в непрерывном режиме для диагностики ионосферы. Единственный «украинский» штатный ионозонд (IPS-42, австралийского производства, 1982 г. выпуска), регулярно работающий в режиме 15-минутного зондирования, находится на Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский». Эта установка также давно устарела, и в процессе эксплуатации регулярно требует ремонта. Ближайшие к территории Украины современные станции ВЗИ находятся на больших расстояниях (порядка 1000 км) в Праге и в Москве. Учитывая активные украинские наземно-космические программы и перспективные проекты по исследованию геокосмоса, развитию спутниковых технологий в области навигации, связи и информации, назрела необходимость создания национальных установок зондирования ионосферы. К сожалению, сегодня ни одно из ведомств Украины, заинтересованных в информации об ионосфере, не располагает финансовыми ресурсами для приобретения хотя бы одного современного «дигизонда» (его стоимость составляет более 200 тыс. долларов США). В связи с этим в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины (РИ НАН Украины) в рамках двух научных программ (Государственной программы исследований Украины в Ан-

тарктике и Целевой научной программы НАН Украины по космическим исследованиям) совместно с Международным центром теоретической физики имени Абдус Салама проведены работы по созданию экономичного портативного современного ВЧ-комплекса когерентного зондирования ионосферы.

Разработанный комплекс позволяет проводить ионосферную диагностику в непрерывном режиме и не требует больших финансовых затрат. Ближайшими целями для его практического использования является эксплуатация на УАС «Академик Вернадский», а также оснащение аналогичными установками нескольких обсерваторий в Украине для создания системы подспутникового ионосферного мониторинга (СПИМ) и информационного обеспечения национального Центра космической погоды.

При создании макета комплекса для расширения его диагностических возможностей применены оригинальные методы частотно-углового зондирования [4], многопозиционной доплероскопии ионосферы [15] и частотно-временной селекции [2, 3], ранее разработанные в РИ НАН Украины.

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

Основным назначением разработанного когерентного ионозонда является измерение ВЧХ ионосферы для расчета профиля электронной концентрации. Кроме этого, он позволяет измерять вертикальную составляющую скорости движения областей отражения зондирующего сигнала на разных частотах в широком интервале высот.

Принцип построения ионозонда основан на идеях, заложенных в конструкцию аналогичных современных устройств, в частности дигизонда DPS4 [14], а также на использовании технологии программного радио SDR (Software Defined Radio) для ионосферного зондирования [11]. Основным отличием данного комплекса от разработанных ранее аналогов является применение связного передатчика сравнительно малой мощности. Достаточные для проведения измерений значения соотношения сигнал/шум на выходе комплекса и разрешающей способности

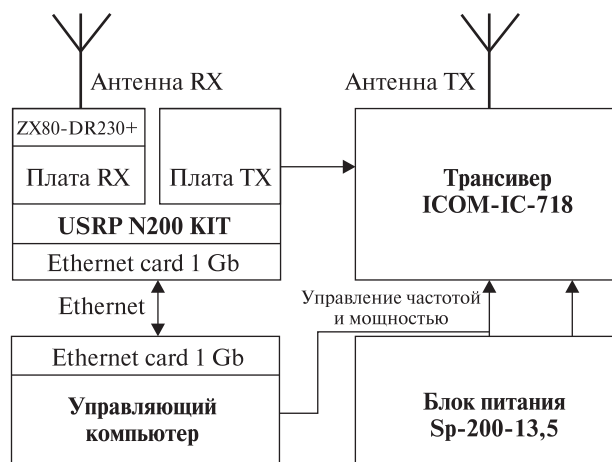


Рис. 1. Блок-схема макета ионозонда

по высоте обеспечиваются за счёт применения длинных фазоманипулированных зондирующих импульсов, их последующей цифровой свертке с опорными кодовыми последовательностями и доплеровской фильтрации, в ходе которой когерентно обрабатываются и накапливаются несколько кодовых посылок на каждой частоте зондирования. Функции обработки и анализа сигналов осуществляются с помощью персонального компьютера (ПК). Аналоговая часть устройства существенно упрощена за счет использования стандартных малоомощного связного передатчика и программного радио (SDR) с широкой полосой пропускания. Использование таких серийных устройств значительно снизило себестоимость созданного макета ионозонда.

Функционально ионозонд состоит из управляющего компьютера, программного радио USRP N200 KIT (Universal Software Radio Peripheral) [<https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>], антенного коммутатора ZX80-DR230+ [<https://ww2.minicircuits.com/pdfs/ZX80-DR230+.pdf>] и трансивера ICOM-IC-718 [9] с блоком питания SP-200-13,5 (рис. 1).

Установка функционирует следующим образом. В управляющем ПК на каждой частоте зондирования формируются пробные импульсы, состоящие из последовательности фазоманипулированных субимпульсов («chirps»). Для генерации субимпульсов используются комплементарные коды [7], которые обеспечивают необхо-

димое высотное разрешение, соответствующее длине одного субимпульса. Такая кодировка улучшает соотношение сигнал/шум пропорционально количеству субимпульсов («битности») кода. В программном радио USRP с помощью цифроаналогового преобразователя эта последовательность преобразуется в аналоговый сигнал, усиливается до необходимого уровня на плате TX и, после усиления трансивером ICOM, подается на передающую антенну. Отраженный от ионосферы сигнал поступает на приёмную антенну, а с нее — на приёмную плату RX устройства USRP, где он усиливается до уровня входных напряжений АЦП. После оцифровки принятый сигнал поступает в ПК, который выполняет функции управления программным радио, формирования и обработки сигналов, отображения и сбора данных, их хранения и анализа.

Основные технические параметры комплекса зондирования ионосферы (без характеристик антенно-фидерной системы) следующие:

диапазон рабочих частот, МГц	1.6...30
диапазон измеряемых высот, км	90...825
разрешающая способность по высоте, км	1.4
максимальная мощность излучения передатчика в импульсе, Вт	100
фиксированная длительность одиночной кодовой посылки, мс.	0.6
количество элементарных субимпульсов в одной кодовой посылке изменяется ступенчато	от 4 до 64 ($2n, n = 2...6$)
количество кодовых посылок на одной частоте в режиме ионозонда	от 1 до 250
потребляемая мощность, Вт	250
вес, кг	10
требования к управляющему компьютеру:	
наличие сетевого адаптера 1Gb Ethernet	

Как видно из рис. 1 для выполнения зондирования требуется две антенны: приемная и передающая. На практике могут использоваться антенны различных типов с рабочей полосой частот 1.6...30 МГц. Для передающей антенны допустимая входная мощность должна быть больше 100 Вт, а коэффициент стоячей волны (КСВ) в антенно-фидерном тракте не должен превышать 2.5.

Параметры режима получения ионограммы могут варьироваться в широких пределах и вы-

бираются в зависимости от внешних условий и поставленной задачи. Определяющим параметром зондирования является количество пробных частот. Его увеличение повышает качество ионограмм и точность определения критических частот ионосферных слоев. Однако при этом возрастает время получения ВЧХ, поэтому выбор числа частот зондирования зависит от заданного темпа построения ионограммы в целом или детализации какого-либо ее высотного фрагмента. Удобство компьютерного управления режимом излучения состоит также в задании неэквидистантного шага по частоте, что позволяет, например, более подробно исследовать ВЧХ конкретных ионосферных областей. Возможность быстрой смены сетки частот зондирования позволяет адаптировать ионозонд к помеховой обстановке в месте его расположения.

Следующим важным параметром режима работы является количество элементарных субимпульсов в одной посылке. Применение коротких субимпульсов позволяет повысить разрешающую способность по высоте отражения, однако при этом расширяется спектр зондирующего сигнала. В диспергирующей среде это может приводить к уменьшению спектральной плотности отражённого широкополосного сигнала. Кроме того, увеличение полосы сигнала, при неизменной мощности излучения, приводит к уменьшению соотношения с/ш.

Увеличение числа когерентных накоплений кодовых посылок на одной частоте приводит к улучшению отношения с/ш и повышению точности измерений. При этом длительность полного цикла зондирования, равная произведению времени измерения на одной частоте на число частот, увеличивается, что может быть неприемлемо для исследования достаточно быстрых ионосферных процессов. Для оценки скорости движения плазмы в ионосфере предусматривается режим излучения с уменьшением числа зондирующих частот. В этом случае результатом зондирования является высотная зависимость доплеровского смещения частоты (ДСЧ) — «доплерограмма». Время накопления принятого сигнала на каждой фиксированной частоте определяет спектральное разрешение и, как следствие,

точность оценки скорости движения. Практика исследований нестационарных процессов в ионосфере показывает, что оптимальным частотным разрешением является 0.1 Гц (длительность накопления 10 с).

Восстановление ионограмм/доплерограмм осуществляется с помощью оригинального пакета прикладных программ, который работает согласно следующему алгоритму. На каждой частоте зондирования рассчитывается функция корреляции принятого и излученного сигналов. После этого для каждой высоты зондирования рассчитывается спектр последовательности значений корреляционной функции, из которого определяется спектральная составляющая с максимальной амплитудой. Амплитуды и частоты таких спектральных составляющих для разных высот представляют собой высотно-частотные распределения интенсивности и ДСЧ отраженного сигнала, т. е. ионограммы и доплерограммы. Результаты такой обработки и параметры, с которыми выполнялось зондирование (частоты и высоты зондирования, число усредняемых кодовых посылок и «битность» кода), записываются на жесткий диск компьютера как текстовые файлы ионограмм (ion) и доплерограмм (dop). Кроме того, ионограммы и доплерограммы визуализируются в виде цветных изображений и сохраняются в графическом формате (png). Примеры ионограмм и доплерограмм будут приведены ниже.

Заметим, что рассмотренный выше алгоритм позволяет легко модифицировать любые параметры зондирования. Для обеспечения циклограммы мониторинговых измерений разработано программное обеспечение автоматического вызова приложений зондирования и обработки данных с заданной периодичностью. При этом стандартный цикл получения ионограмм составляет 15 мин, а доплерограмм — 5 мин. Последнее значение выбрано для обеспечения диагностики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), связанных с распространением атмосферных гравитационных волн (АГВ), периоды которых превышают обратное значение частоты отсечки Брента — Вайсяля (для F-области ионосферы — это примерно 10 мин). Тестовые испытания ионозонда позволили оценить опти-

мальные параметры для выполнения зондирования. Для построения достаточно подробных ионограмм — это 200 зондирующих частот и 100 кодовых посылок на каждой частоте. В таком случае время получения ионограммы составляет около трех минут. Меньшее количество частот ухудшает детализацию структуры ионосферных слоев, а увеличение времени усреднения не приводит к существенному улучшению соотношения с/ш из-за частичной потери когерентности ионосферного сигнала, и неоправданно удлиняет время получения ионограммы. Для доплерограммы используется 25 частот зондирования и 1500 посылок на каждой частоте. При этом время получения каждой доплерограммы составляет около 4 мин, а доплеровское разрешение — около 0.1 Гц. Данные параметры были апробированы при проведении зондирований ионосферы в течение нескольких полных суток и построении суточных распределений высот ионосферных слоев и скоростей их вертикального движения. Для наглядного отображения временных изменений параметров ионосферы было разработано программное обеспечение, позволяющее проводить визуализацию ВЧХ в виде вариаций информационного параметра в координатах время — высота («Sky-maps»). Информационным параметром Sky-map при классическом ВЗИ являются высотно-временные зависимости частот отражения зондирующих сигналов. В случае, если на выходе ионозонда сохранена информация о мощности отраженного сигнала, появляется возможность получать зависимости высотно-временных вариаций мощности в полосе зондирующих частот, так называемые НТИ-диаграммы (Height-Time-Intensity) [8]. Для когерентного зондирования существенным преимуществом является возможность визуализации высотно-временных вариаций скоростей изменения фазовых путей сигналов зондирования, которые легко оцениваются по ДСЧ. Получаемые таким образом вариации ДСЧ на разных высотах отражения позволяют получить информацию о высотном профиле движений в ионосфере. Поскольку при пространственном разнесении приемных позиций основными диагностическими параметрами также являются значе-

ния ДСЧ в каждом пункте наблюдений, появляется возможность объединения метода ВЗИ с многопозиционным доплеровским зондированием. Такая комбинация двух методов диагностики ионосферы является продуктивной, например, для восстановления трехмерной структуры АГВ/ПИВ.

КОМПЛЕКС МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Целью многопозиционного зондирования ионосферы является восстановление пространственно-временной структуры ионосферных неоднородностей. Решение такой задачи реализуется измерением временных задержек или фазовых сдвигов между вариациями информационных параметров в пространственно-разнесенных точках как по высоте (режим ВЗИ), так и в горизонтальной плоскости.

Разработанный в РИ НАН Украины когерентный комплекс ВЧ-зондирования позволяет проводить диагностику ионосферы в трех режимах:

- измерение высотного профиля электронной концентрации (ВЗИ),
- многочастотное вертикальное доплеровское зондирование ионосферы,
- многопозиционное многочастотное доплеровское зондирование ионосферы на наклонных радиоперелиниях.

Комплекс состоит из четырех модулей: одного излучающего и трёх однотипных приёмных установок.

Как уже отмечалось выше, комплекс разработан на базе стандартных устройств, которые выпускаются серийно. Для проведения доплеровских измерений стабильность частоты излучения передатчика обеспечивается опорным генератором, разработанным на базе термостатированного кварцевого осциллятора ОСХО 131-1000. Таким образом, достигается частотная нестабильность измерений не хуже $5 \cdot 10^{-10}$. В качестве передающей антенны может быть применена широкополосная антенна с вертикально ориентированной диаграммой направленности (ромбовидная, дельтаобразная, дипольная и т. д.). Передающий модуль может излучать в одном из трёх режимов:

- импульсное излучение с изменяющейся частотой (режим ионозонда),
- непрерывное/импульсное излучение на фиксированной частоте,
- параллельное непрерывное излучение на нескольких частотах.

Управление режимами работы может осуществляться вручную оператором, автоматически по заданному на локальном ПК расписанию или дистанционно по интернету.

Принцип работы передающего модуля аналогичен описанному выше принципу действия излучающего устройства ионозонда. Пространственно разнесенные приёмные модули состоят из цифрового приёмника WinRadio G-313i и компьютера. Для стабилизации частоты гетеродинов приёмника также применяется опорный генератор на базе кварцевого осциллятора ОСХО 131-1000. Для небольших пространственных разносов в квазивертикальном режиме зондирования в качестве приёмных антенн могут эффективно использоваться достаточно компактные рамочные антенны.

Приёмный модуль работает следующим образом. Аналоговый сигнал с антенны поступает на приёмник, фильтруется, переносится на промежуточную частоту, преобразовывается в цифровой вид и далее подаётся на компьютер. ПК обеспечивает управление работой модуля, выполняет экспресс-обработку сигналов, осуществляет отображение результатов зондирования и архивирование данных измерений. При наличии доступа к интернету в выносном пункте наблюдения всеми перечисленными функциями можно управлять дистанционно. Взаимная временная синхронизация работы пространственно разнесенных модулей осуществляется с помощью GPS-приемников.

Двухпозиционный комплекс когерентного ионосферного зондирования, разработанный по описанным выше принципам, создан в РИ НАН Украины и успешно эксплуатируется в Антарктиде, начиная с мая 2015 г. Его передающий модуль установлен в центральном здании Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский». На расстоянии примерно 500 м от передатчика расположен первый приёмный мо-

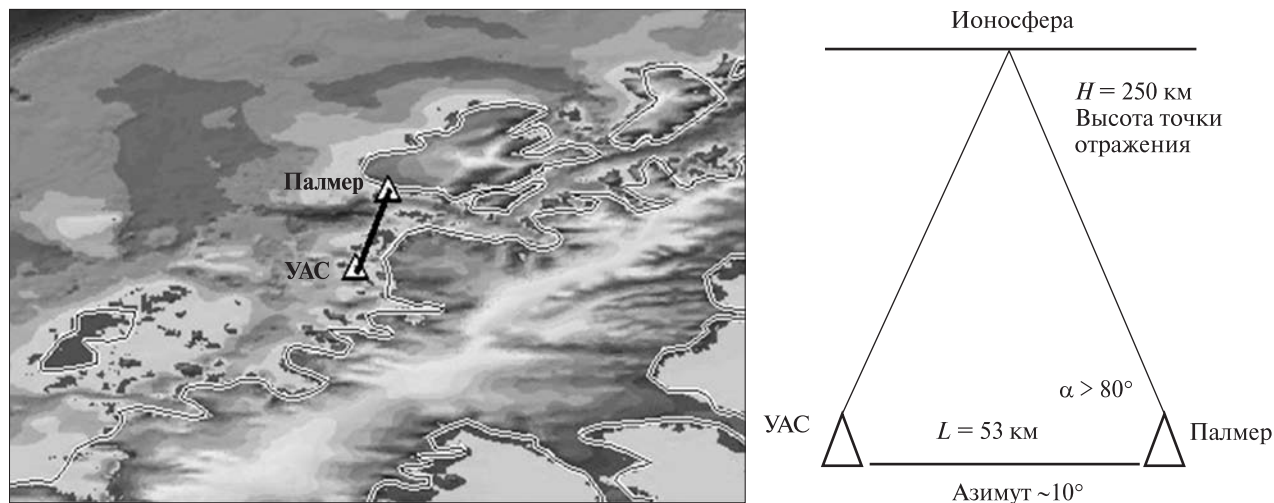


Рис. 2. Схема доплеровского ВЧ-зондирования ионосферы в Антарктике

дуль. Второй приёмный модуль двухпозиционной системы зондирования создан и эксплуатируется коллегами из Исследовательского института при Бостон-колледже (Institute for Scientific Research at Boston College, Mass. USA). Он расположен на американской антарктической станции «Палмер». Расстояние между приёмной и передающей позициями по поверхности Земли составляет около 53 км и 26.5 км — между точками отражения в ионосфере (рис. 2).

На станции «Палмер» установлен модуль, содержащий три независимых АЦП, а его антенно-фидерная система состоит из трёх рамочных антенн, разнесённых друг относительно друга на несколько десятков метров. С использованием метода частотно-углового зондирования ионосферы [5] на этом трёхканальном приёмном комплексе можно восстанавливать не только доплеровские спектры отражённого от ионосферы сигнала, но и вариации углов прихода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОГЕРЕНТНОГО ИОНОЗОНДА

Первые полевые испытания макета ионозонда были проведены с различными антенными системами. Наиболее простым и бюджетным решением, пригодным для создания мобильных комплексов, является использование стандартных радилюбительских петлевых дипольных антенн класса ICOM АН-710 [<http://www.icom.co.jp/>

[world/support/download/manual/pdf/АН-710.pdf](http://www.icom.co.jp/world/support/download/manual/pdf/АН-710.pdf)]. В то же время эффективность таких антенн уступает антеннам бегущей волны, которые обычно применяются в серийно выпускаемых ионозондах. Тестовые измерения показали, что при использовании ICOM АН-710 для получения ионограмм требуется накапливать 200 или более зондирующих импульсов. Это приемлемо для измерений в доплеровском режиме, однако в режиме ионограмм приводит к увеличению времени зондирования до 6 мин, либо к уменьшению числа рабочих частот и получению недостаточно детальных ВЧХ. Поэтому основной объём тестовых измерений был выполнен на штатных антеннах ионозонда IPS-42 [10], размещённого на УАС, и с помощью антенн ионосферной станции «Базис» Института ионосферы НАН Украины и МОН Украины [1].

На Украинской антарктической станции измерения проводились во время сезонных работ 22-й Украинской антарктической экспедиции в марте — апреле 2017 г. Для тестирования нового комплекса был организован режим автоматического последовательного восстановления ВЧХ штатным ионозондом IPS-42 и макетом нового ионозонда. Ионограммы, полученные практически одновременно двумя устройствами, приводились к идентичным диапазонам высот отражения и частот зондирования и отображались для сравнительного анализа с одинаково-

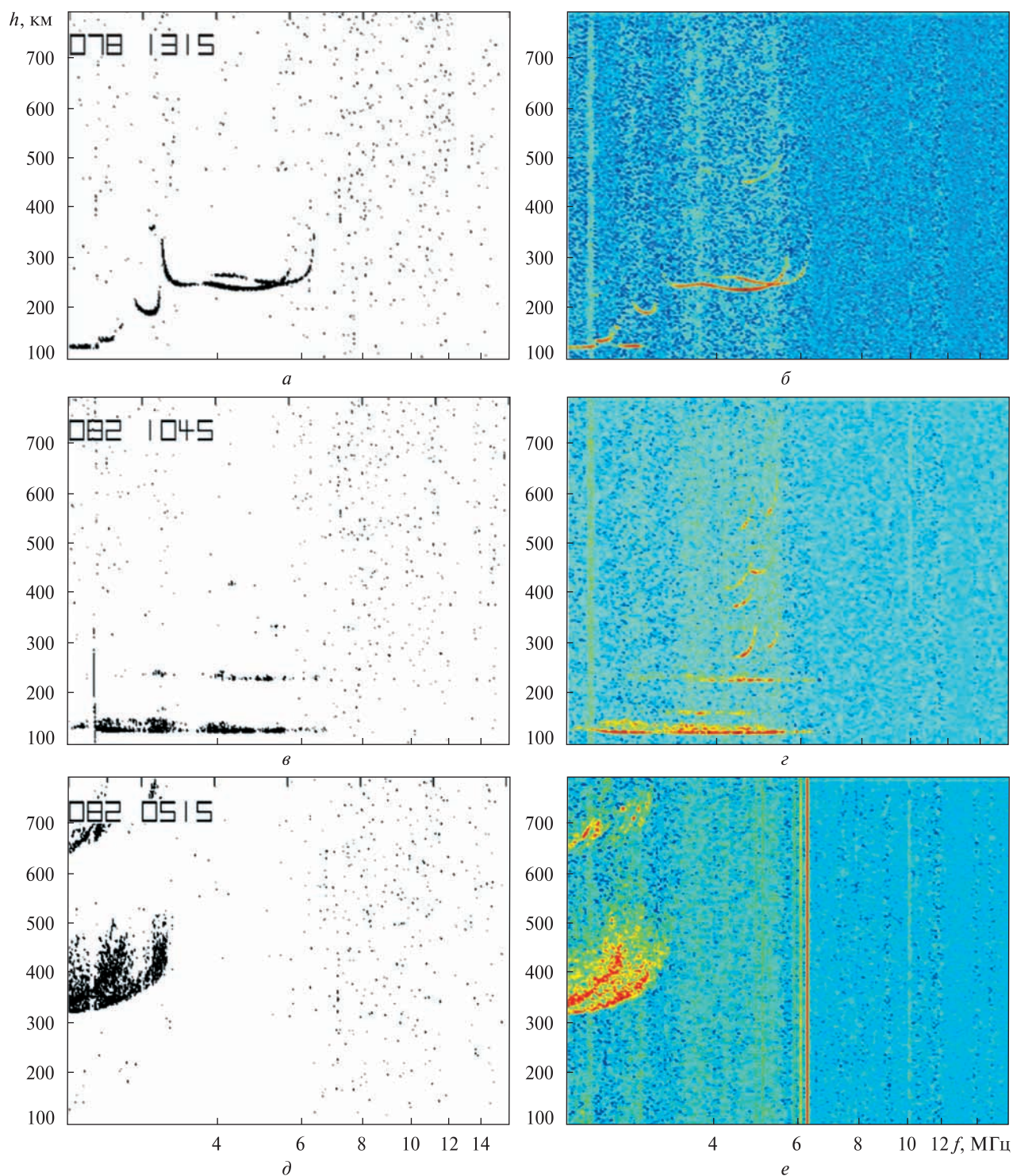


Рис. 3. Сопоставление ионограмм, полученных ионозондом IPS-42 (слева) и макетом ионозонда РИ НАН Украины (справа) для условий: *а, б* — спокойной дневной ионосферы; *в, г* — при наличии экранирующего спорадического слоя Es; *д, е* — при наличии эффекта F-рассеяния. На ионограммах IPS-42 указан номер дня 2017 г. и локальное время зондирования

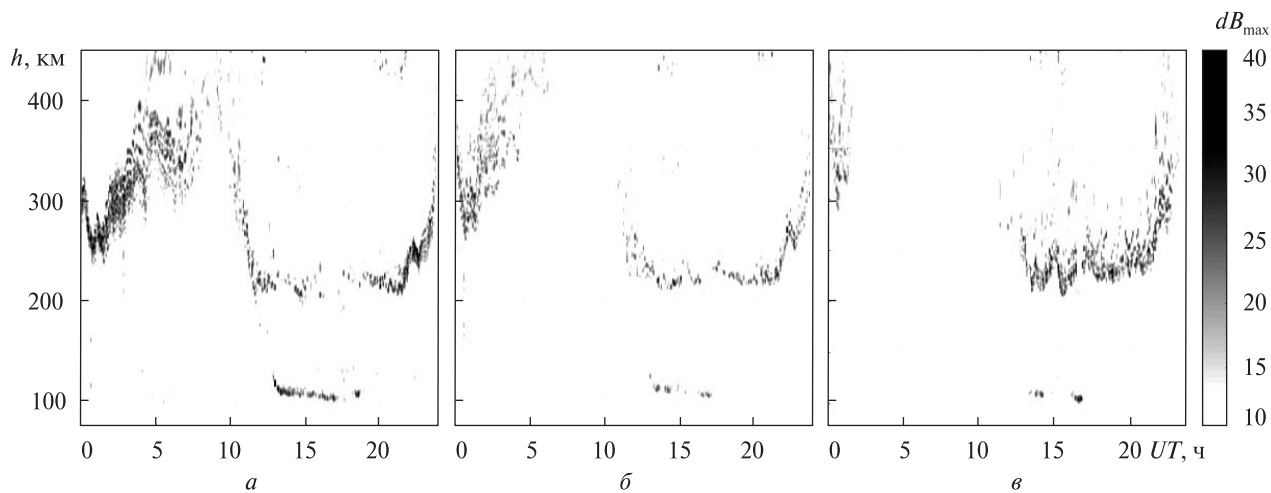


Рис. 4. Примеры НТИ-диаграмм для 8 апреля 2017 г. в полосах зондирующих частот: а — 1...3 МГц, б — 3...4 МГц, в — 4...10 МГц

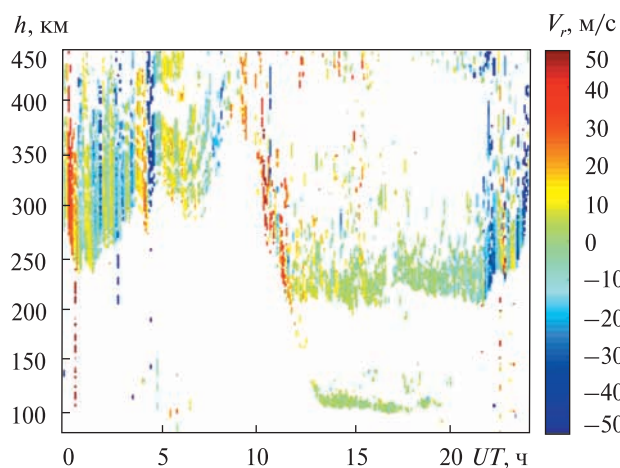


Рис. 5. Доплеровский «sky map», полученный на УАС 8 апреля 2017 г.

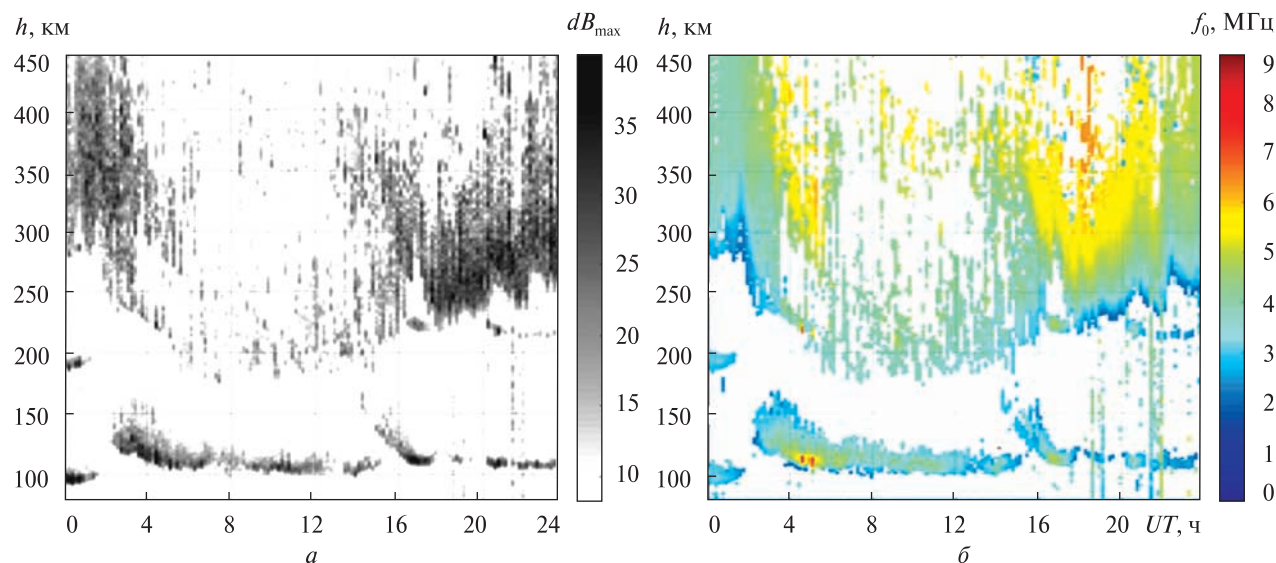


Рис. 6. Sky-maps-поведения интенсивности (а, $f_0 = 1...8$ МГц) и плазменных частот f_0 (б, $f_0 = 0...9$ МГц) отраженных сигналов над Харьковской областью 21 июня 2017 г.

выми масштабами, но в разных цветовых гаммах. Результаты совместных измерений продемонстрировали высокую степень подобия ионограмм, полученных с обоих устройств, вне зависимости от состояния ионосферы.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления ионограмм для различных ионосферных условий. Ионограммы на рис. 3, *а, б* соответствуют спокойным дневным условиям, рис. 3, *в, г* демонстрируют ВЧХ при наличии экранирующего слоя Es, проявление эффекта F-рассеяния показано на рис. 3, *д, е*. Как наглядно видно из графического сопоставления результатов зондирования двумя устройствами, структуры ВЧХ практически идентичны. Незначительные фрагментарные отличия наблюдаются только для участков резких изменений электронной плотности. Несколько более четкая структура ВЧХ, восстановленная ионозондом IPS-42, объясняется использованием большего числа зондирующих частот (576) по сравнению с испытываемым макетом (200). В то же время видно, что ионозонд РИ НАН Украины позволяет лучше отождествлять ионосферные слои, экранируемые слоем Es, чем IPS-42 (рис. 3, *а—г*). Также следует учитывать, что ионограммы IPS-42 имеют всего две градации чувствительности, поскольку определяется только факт наличия отражения по превышению сигналом заданного порогового уровня.

Макет нового ионозонда измеряет мощность ионосферного сигнала в широком динамическом диапазоне, что позволяет более подробно восстановить высотную структуру отражений.

Таким образом, можно констатировать, что ионозонд разработки РИ НАН Украины при 30-кратном по отношению к IPS-42 уменьшении мощности излучения демонстрирует достаточно высокую эффективность ионосферной диагностики, экономичность изготовления и multifunctionality использования.

Как уже отмечалось, существенным преимуществом разработанного устройства является регистрация мощности отраженного сигнала. Это дает возможность построения высотно-временных зависимостей уровней отражений, так называемых НТИ-диаграмм (height-time-intensity) [8]. Диаграмма строится во всем диапазоне рабо-

чих частот зондирования на заданном временном интервале, например за сутки. Подобные зависимости позволяют обнаруживать квазипериодические вариации высот отражений, и следовательно, идентифицировать волновые возмущения. На рис. 4 показаны НТИ-диаграммы в разных полосах частот.

Как уже отмечалось, принципиальным преимуществом разработанного устройства является возможность определения вертикальных составляющих скорости движения отражающих областей. В качестве примера такого режима на рис. 5 представлено суточное высотно-временное распределение вертикальной скорости (доплеровская «sky map»).

Еще один комплект макета ионозонда прошел полевые испытания на обсерватории Института ионосферы Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, расположенной вблизи г. Змиев (Харьковская область). Измерения проводились во время летнего солнцестояния 2017 г. в течение трех суток (20, 21 и 22 июня). В качестве антенной системы использовались штатные приемная и передающая антенны серийного ионозонда «Базис». Зондирование выполнялось с шагом по времени 10 мин. Для этого эксперимента также рассчитывались суточные высотно-частотные зависимости ионосферных параметров, представленные на рис. 6. Наглядность такого представления результатов зондирования позволяет качественно анализировать динамические процессы в ионосфере регулярного и случайного характера, в частности выделять проявление эффектов ПИВ, развитие и релаксацию спорадических образований и других ионосферных возмущений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины совместно с Международным центром теоретической физики разработан новый портативный когерентный ионозонд. Испытания двух идентичных макетов ионозонда в Антарктиде и в Украине показали надежность и эффективность его использования в полевых условиях. Макет может быть использован в качестве прототипа

при изготовлении малой серии ионозондов с целью их размещения на территории Украины.

Важным преимуществом по сравнению с современными зарубежными аналогами является комплектация приемной и передающей систем ионозонда стандартными серийными устройствами, что значительно уменьшает стоимость изготовления. Следует также отметить существенное снижение энергопотребления такого комплекса, что также является важным достоинством при его постоянной эксплуатации, особенно в Антарктике. Авторам представляется целесообразным оснащение подобными комплексами нескольких обсерваторий в Украине для создания национальных систем подспутникового ионосферного мониторинга и космической погоды.

Основные результаты, представленные в данной статье, получены в соответствии с «Целевой комплексной программой НАН Украины научных космических исследований» в ходе выполнения НИР «Лирус-3» (номер госрегистрации 0117U002393). Приобретение комплектующих для изготовления макета ионозонда и его испытания во время сезонной экспедиции 2017 г. на УАС «Академик Вернадский» были профинансированы Национальным антарктическим научным центром Украины в соответствии с «Государственной целевой научно-технической программой проведения исследований в Антарктике» в рамках НИР «Гелиомакс-17» (номер госрегистрации 0117U006837с). Разработки основных принципов построения ионозонда, пакетов прикладных программ регистрации и обработки данных зондирования выполнены при финансовой поддержке ведомственной НИР НАН Украины «Ятаган-3» (номер госрегистрации 0116U000035).

Авторы признательны сотрудникам Международного центра теоретической физики имени Абдуса Салама (г. Триест, Италия) Бруно Нава и Марко Зеннаро за возможность реализации лабораторного макета ионозонда, помощь в разработке его функциональной схемы, а также ценные консультации в области программных радио.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить зимовщиков 21-й и 22-й Украинской антарктической экспедиции О. В. Буданова и Б. Ю. Гаврилюка за помощь в установке оборудо-

вания на УАС и его техническое обслуживание. Мы также признательны сотрудникам Института ионосферы НАН Украины и МОН Украины, кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина за предоставленную возможность испытания макета ионозонда на обсерваториях этих организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов Л. Я., Кононенко А. А. Ионозонд «Базис» Института ионосферы как средство для мониторинга состояния ионосферы // Радиотехника. — 2011. — Вып. 167. — С. 30—33.
2. Зализовский А. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Исследования в Антарктике частотно-временных характеристик ВЧ сигналов на сверхдлинных радиолниях // Укр. Антарктический журн. — 2015. — № 14. — С. 124—137.
3. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Сопин А. А., Пикулик И. И. О возможности бистатического ВЧ зондирования ионосферы сигналами точного времени // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — № 1. — С. 34—42.
4. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // Radio Sci. — 1995. — 30, N 6. — P. 1739—1752.
5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznukhov V. V., Foster J. C., Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs // Radio Sci. — 2003. — 38. — doi:10.1029/2002RS002861.
6. Gillmor C. S. The Big Story: Tuve, Breit, and Ionospheric Sounding, 1923—1928 // Book History of Geophysics: Vol. 5. The Earth, the Heavens and the Carnegie Institution of Washington / Ed. by G. A. Good. — 2013. — P. 133—141. — doi: 10.1029/HG005p0133.
7. Golay M. S. Complementary Codes // IRE Trans. Inform. Theory. — April 1961.
8. Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude // J. Atmos. Sol. and Terr. Phys. — 2006. — 68. — P. 539—557.
9. HF fall band transceiver IC-718, A5649-1EX-10. — 2017. — 62 p.
10. IPS-42. Operating instructions and technical manual, KEL Aerospace Pty. Ltd. — 1982. — 137 p.
11. Morris A. Design of a flexible and low-power ionospheric sounder: A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. — Fairbanks, Alaska, USA: University of Alaska Fairbanks, 2014.
12. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Lisysyan I. A., Bibl K., Cheney G., Kitrosser D., Stelmash S., Roche K., Luo Y., Paznukhov V. V., Hamel R. Advancing digisonde technology: the DPS-4D // AIP Conf. Proc. 974. Radio Sounding and Plasma Phys. — 2008. — P. 127—143. — doi:10.1063/1.2885023.

13. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) // *Earth Planets and Space*. — 2011. — 63, N 4. — P. 377—381.
14. Reinisch B. et al. The digisonde portable sounder — DPS. Techn. manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. — 2007. — Version 4.3. — 404 p.
15. Zalozovskii A. V., Galushko V. G., Kashcheev A. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Egorov I. B., Popov A. V. Doppler selection of HF radi signals on long paths // *Geomagn. and Aeronomy*. — 2007. — 47, N 5. — P. 636—646. — doi: 10.1134/S001679320705012X.

Стаття надійшла до редакції 24.01.18

REFERENCES

1. Emel'yanov L. Y., Kononenko A. A. Ionosonde "Basis" Instituta ionosferi kak sredstvo dlya monitoringa sostojaniya ionosferi. *Radiotekhnika*, **167**, 30—33 (2011) [in Russian].
2. Zalozovski A. V., Koloskov A. V., Yampolski Y. M. Studying in Antarctica the time-frequency characteristics of HF signals at the long radio paths. *Ukrainian Antarctic J.*, **14**, 124—137 (2015) [in Russian].
3. Kashcheyev S. B., Zalozovski A. V., Sopin A. A., Pikulik I. I. On the possibility of bistatic HF ionospheric sounding by exact time signals. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **18** (1), 34—42 (2013) [in Russian].
4. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. *Radio Sci.*, **30** (6), 1739—1752 (1995).
5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznukhov V. V., Foster J. C., Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs. *Radio Sci.*, **38** (2003). — doi:10.1029/2002RS002861.
6. Gillmor C. S. History of Geophysics: Vol. 5. The Earth, the Heavens and the Carnegie Institution of Washington. The Chapter: The Big Story: Tuve, Breit, and Ionospheric Sounding, 1923—1928. Ed. by G. A. Good. (2013). — doi: 10.1029/HG005p0133.
7. Golay M. S. Complementary Codes, *IRE Trans. on Information Theory*, April 1961.
8. Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **68**, 539—557 (2006).
9. HF all band transceiver IC-718, A5649-1EX-10. 62 p. (2017).
10. IPS-42. Operating instructions and technical manual, KEL Aerospace Pty. Ltd. 137 p. (1982).
11. Morris A. Design of a flexible and low-power ionospheric sounder: A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA. (2014).
12. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Lisysan I. A., Bibl K., Cheney G., Kitrosser D., Stelmash S., Roche K., Luo Y., Paznukhov V. V., Hamel R. Advancing digisonde technology: the DPS-4D. *AIP Conf.*

Proc. 974, *Radio Sounding and Plasma Physics*, 127—143 (2008). — doi:10.1063/1.2885023.

13. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). *Earth Planets and Space*, **63** (4), 377—381 (2011).
14. Reinisch B. et al. The digisonde portable sounder — DPS. Technical manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. Version 4.3. — 404 p. (2007).
15. Zalozovskii A. V., Galushko V. G., Kashcheev A. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Egorov I. B., Popov A. V. Doppler Selection of HF Radi signals on Long Paths. *Geomagnetism and Aeronomy*, **47** (5), 636—646 (2007). — doi: 10.1134/S001679320705012X.

Received 24.01.18

A. B. Залізовський¹, А. С. Кашчєєв^{1,2}, С. Б. Кашчєєв¹,
О. В. Колосков¹, В. М. Лисаченко¹, В. В. Пазнухов³,
І. І. Пікулік¹, А. О. Сопін¹, Ю. М. Ямпольський¹

¹ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків, Україна

² Міжнародний центр теоретичної фізики імені Абдус Салама, м. Трієст, Італія

³ Дослідницький інститут при Бостон коледжі, штат Массачусетс, США

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО КОГЕРЕНТНОГО ІОНОЗОНДА

Вертикальне зондування іоносфери (ВЗІ) — найстаріший та все ще один з найпоширеніших методів діагностики атмосферної плазми Землі. Сьогодні діє всесвітня мережа зондувальних станцій ВЗІ, розроблених різними дослідницькими групами; однак теперішнього покриття все ще недостатньо для сучасних наукових і експлуатаційних цілей. Це пов'язано, перш за все, з обмеженою часовою та просторовою роздільною здатністю наявних систем ВЗІ. Таким чином, побудова щільної глобальної мережі станцій ВЗІ з покращеними експлуатаційними характеристиками є важливою задачею для іоносферного співтовариства. Як країна з діючою програмою космічних досліджень, Україна матиме значні переваги від можливості отримувати в режимі реального часу дані про стан іоносфери, збурення якої впливають на якість зв'язку з супутниковими системами. На сьогоднішній день на території України немає жодної постійно діючої станції ВЗІ. Тому створення системи іоносферного зондування стане важливим кроком у розвитку національних космічних досліджень. Статтю присвячено розробці та створенню прототипу портативного цифрового іонозонда, який дозволяє провадити безперервну іоносферну діагностику без значних фінансових витрат. Розроблена система базується на технології радіосистем, що керуються програмно. Це надає розробці переваги високої експлуатаційної гнучкості, малого розміру, низького енергоспоживання та вартості. Так, система споживає

менше 50 Вт вхідної потужності. Значною перевагою є також використання фазово-імпульсної модуляції сигналів, що забезпечує додаткове поліпшення відношення сигнал/шум за рахунок використання методики стиснення довгих кодованих імпульсів. Таким чином, було розроблено прототип недорогого малопотужного портативного когерентного іонозона. Перші лабораторні та польові випробування нового приладу були проведені в Україні та Антарктиці. У квітні 2017 року систему було встановлено на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (УАС). Порівняння іонограм, отриманих на УАС за допомогою розробленого прототипу та традиційного аналогового іонозона IPS-42, продемонстрували високу якість та вищу роздільну здатність нового інструмента ВЗІ. Стаття описує принципи роботи, функціональну схему та основні технічні характеристики іонозона. Наведено також приклади іонограм, добових висотних залежностей плазмових частот іоносфери, доплерівських частотних зсувів та інтенсивностей відбитих сигналів зондування, що було отримано на УАС та поблизу Харкова. Перші результати випробувань двох однакових прототипів систем ВЗІ в Антарктиці та Україні показали надійність та ефективність їхнього застосування для діагностики іоносфери. Розроблена система може бути використана як базовий прототип для виготовлення обмеженої кількості іонозондів та їхньої установки в Україні. Важливими перевагами нової системи є її простота, низька собівартість виробництва та низьке енергоспоживання, що є найважливішим фактором для забезпечення безперервної експлуатації, особливо в таких віддалених місцях, як Антарктида. Автори рекомендують оснастити декілька обсерваторій в Україні розробленою системою зондування як перший крок до створення національної мережі моніторингу іоносферних умов та космічної погоди.

Ключові слова: іоносфера, іонозонд, когерентне ВЧ-зондування.

A. V. Zalizovskiy¹, A. S. Kashcheyev^{1,2}, S. B. Kashcheyev¹,
A. V. Koloskov¹, V. N. Lisachenko¹, V. V. Paznukhov³,
I. I. Pikulik¹, A. A. Sopin¹, Yu. M. Yampolski¹

¹ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Telecommunication/ICT for Development Laboratory, Trieste, Italy

³ Institute for Scientific Research, Boston College, 140 Commonwealth Ave., Chestnut Hill, MA 02467, US

A PROTOTYPE OF A PORTABLE COHERENT IONOSONDE MODEL

Vertical sounding of the ionosphere (VSI) is the oldest and still one of the most widely used methods of diagnostics of the Earth atmosphere's plasma. Today there exists a worldwide

network of the VSI sounders developed by different research groups; however, the existing coverage is still not sufficient for modern scientific and operational purposes. Primarily this is because of the limited temporal and spatial resolution provided by the available VSI systems. Thus, establishing a denser global network of the VSI stations with better operational characteristics is an important topic in the ionospheric community. Being a country with an active space research program, Ukraine will benefit from having near real-time specification of the state of the ionosphere, through which the communication with satellite systems is performed and which can be affected by the presence of the ionospheric disturbances. As of today, there is not a single routinely operating VSI system in Ukraine. Establishing a system of ionospheric monitoring will be an important step in advancing national space research. This paper deals with developing and prototyping of a portable digital ionosonde that allows carrying out continuous ionospheric diagnostics without significant financial expenditures. The designed system is based on the software-defined radio (SDR) technology which offers benefits of flexibility, small form factor, low power, and low cost. The system consumes less than 50 W of input power. Operation takes advantage of using the long phase coded transmit pulse, which provides additional SNR improvement by implementing a pulse compression technique. As a result, we developed a prototype of a low-cost, low-power portable coherent ionosonde. First laboratory and field tests of the new vertical sounder have been made in Ukraine and Antarctica. In April 2017, the system was installed at the Ukrainian Antarctic station «Akademik Vernadsky» (UAS). A comparison of the ionogram measurements made at the UAS with the developed prototype system and with a conventional analog ionosonde IPS-42 showed a high quality and higher resolution of the new VSI instrument. This paper describes the principles of operation, a functional diagram, and main technical characteristics of the ionosonde. We present also the examples of ionograms and diurnal altitude dependences of ionospheric plasma frequencies, Doppler frequency shifts and intensities of the reflected sounding signals from the measurements made at the UAS and near Kharkiv. The initial tests of two identical VSI system prototypes in Antarctica and Ukraine showed the reliability and efficiency of their application for the diagnostics of the ionosphere. The developed sounder can be used as a base prototype for manufacturing of a limited number of ionosondes and their installation in Ukraine. An important advantage of the new system is its simplicity, low production cost and low power consumption, which are the most critical factors for continuous operation, especially at the remote locations like Antarctica. The authors recommend equipping several observatories in Ukraine with this kind of sounding system as the first step towards establishing the National network for monitoring ionospheric conditions and space weather.

Keywords: ionosphere, ionosonde, coherent HF sounding.

І. І. Синявський¹, Ю. С. Іванов¹, . Г. Сосонкін¹, Г. П. Міліневський^{1,2,3}, Г. В. Кошман¹

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

² Міжнародний центр науки майбутнього, Цзилінський університет, Чанчунь, Китай

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ІМІДЖЕР-ПОЛЯРИМЕТР КОСМІЧНОГО ПРОЕКТУ «АЕРОЗОЛЬ-UA»

Аерозолі в земній атмосфері є найменш вивченим компонентом, через що є певна невизначеність в оцінці їхнього впливу на радіаційний баланс планети. Більше того, інформації про глобальний розподіл антропогенних аерозолів практично немає, що вкрай ускладнює тестування і поліпшення моделей переносу аерозолів в атмосфері і прогрес в розумінні антропогенного впливу на клімат та довкілля. Після невдалого запуску місії *Glory* у 2011 році з'явився розрив у наявності сучасних аерозольних орбітальних інструментів, тому, що запуски аналогічних типів приладів заплановані на 2019 рік і пізніше. Це одна з причин того, що ми розглядаємо науковий космічний проект з аерозольним сканувальним поляриметром «СканПол», та мультиспектральним іміджером-поляриметром (МСІП) на борту космічного апарата як своєчасну місію, яка дозволить отримати необхідні мікрофізичні і хімічні параметри, визначивши показник заломлення природних і антропогенних аерозолів. Основним призначенням одного з приладів проекту «Аерозоль-UA» інструмента МСІП є проведення поляриметричних та фотометричних вимірювань розсіяного сонячного випромінювання з метою подальшого отримання інформації про характеристики аерозолів, а також визначення впливу хмарності на вимірювання з поляриметром «СканПол». Запропонована власна концепція оптичної схеми іміджера-поляриметра, яка базується на принципі поділу вхідного зображення на чотири квазіідентичні вторинні зображення. Такий підхід дозволяє уніфікувати оптичну схему каналів поляриметра, яка дозволяє трансформувати поляризаційний канал у фотометричний канал з чотирма субканалами із різними спектральними діапазонами. Така трансформація виконується заміною секторного поляризатора на секторний фільтр з чотирма різними довжинами хвиль у кожному секторі. Поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних каналів з полем зору $60 \times 60^\circ$. Три канали є поляризаційними, кожний з яких дозволяє проводити поляриметричні вимірювання трьох параметрів Стокса I , Q , U в центральних довжинах хвиль $\lambda = 410, 555, 865$ нм зі спектральними півишинами $FWHM = 20$ нм. Два канали МСІП призначено для фотометричних вимірювань у восьми спектральних діапазонах з центральними довжинами хвиль $\lambda = 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865, 910$ нм зі спектральними півишинами $FWHM = 20 \dots 40$ нм. Проведено розрахунок та оптимізацію кожної із оптичних схем та моделювання механічної конструкції поляриметра. Виготовлено, складено та від'юстовано експериментальний зразок одного з оптичних каналів поляриметра МСІП. Попередні результати дослідження продемонстрували збіжність теоретичних та експериментальних розрахунків оптичної схеми каналів МСІП. Слід зауважити, що дослідження проводилися без поляризаційного елемента. Подальші етапи будуть пов'язані з лабораторним дослідженням та калібруванням поляризаційних характеристик МСІП, зокрема з оцінюванням інструментальної поляризації та визначенням можливостей її врахування.

Ключові слова: аерозолі, зображувальний поляриметр, космічний експеримент.

ВСТУП

Аерозолі в земній атмосфері є найменш вивченим компонентом, в результаті чого є невизначеність в оцінці їхнього впливу на радіаційний баланс планети. Більше того, інформації про глобальний розподіл антропогенних аерозолів практично немає, що вкрай ускладнює тестування і поліпшення моделей переносу аерозолів в

атмосфері і прогрес в розумінні антропогенного впливу на клімат та довкілля.

Після невдалого запуску місії «Глорія» [13] у 2011 р. утворилась прогалина в ряду сучасних аерозольних орбітальних інструментів, тому що запуски аналогічних типів приладів заплановані на 2019 р. і пізніше. Це одна з причин того, що ми розглядаємо науковий космічний проект з аерозольним сканувальним поляриметром «СканПол» [2] та мультиспектральним іміджером-поляри-

© І. І. СИНЯВСЬКИЙ, Ю. С. ІВАНОВ, М. Г. СОСОНКІН,
Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ, Г. В. КОШМАН, 2018

метром МСІП на борту космічного апарата як своєчасну місію, яка дозволить отримати необхідні мікрофізичні і хімічні параметри шляхом визначення показника заломлення природних і антропогенних аерозолів [2, 12].

Основним призначенням одного з приладів проекту «Аерозоль-UA» інструмента МСІП є проведення поляриметричних та фотометричних вимірювань розсіяного сонячного випромінювання з метою подальшого отримання інформації про характеристики аерозолів, а також визначення впливу хмарності на вимірювання з поляриметром «СканПол». Основні характеристики МСІП та стан його розробки є темою нашої роботи.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИМЕТРА МСІП

Відомо, що поляризація розсіяного сонячного випромінювання є максимально чутливою до мікрофізичних властивостей аерозольних та хмарних частинок, і без залучення поляриметричних спостережень вирішення проблеми визначення параметрів аерозолу неможливе у принципі [14]. У відповідності до детального аналізу, виконаного в роботі [13], орбітальний інструмент, призначений для точного і комплексного дистанційного зондування аерозолів і хмар, повинен мати кілька вузьких спектральних каналів, розподілених по спектральному інтервалу приблизно від 400 до 2000 нм. Крім того, прилад повинен вимірювати принаймні три перших параметри Стокса в усіх спектральних каналах, причому фотометрична точність вимірювань повинна бути не гіршою за 4 %, а похибка вимірювання ступеня поляризації повинна бути не більшою за 0.1...0.2 %. Сканування вздовж траєкторії польоту повинно дозволити інструменту «побачити» кожен елемент поверхні приблизно під 100 різними спостережними кутами, що кардинально збільшує інформаційний зміст вимірювань [10]. Більш того, висока кутова роздільна здатність дозволить визначати ефективний радіус хмарних крапель з виключно високою точністю [5, 6]. Алгоритми обробки поляриметричних даних повинні включати всі новітні теоретичні розробки [7, 8, 22].

З усіх орбітальних поляриметрів, виготовлених до теперішнього часу, тільки інструмент типу поляриметра APS місії «Глорія» [13] дозво-

ляє здійснити всю сукупність спостережень. За прототип сканувального поляриметра «СканПол» вибрано саме оптичну схему та методику вимірювань інструмента APS. У зв'язку з обмеженими характеристиками платформи «YuzhSat» розробки КБ «Південне» [4], яку планується використати для орбітальної місії «Аерозоль-UA» з інструментами «СканПол» та МСІП, ми обмежились для «СканПол» найінформативнішими каналами — $\lambda\lambda = 370, 410, 865, 1380, 1610$ нм. Єдиним недоліком інструмента «СканПол» порівняно з поляриметром POLDER Європейського космічного агентства [12] є відсутність панорамних спостережень. Концепцію «СканПол» призначено для високоточних поляриметричних вимірювань, вона допускає спостереження тільки вздовж траєкторії польоту з вузьким полем зору, меншим за 1° . Проте з точки зору кліматичних вимірювань цей недолік не є критичним, і його можна виправити комбінацією інструментів [9, 14].

Саме для задач визначення просторового розподілу аерозолів авторами запропоновано використання мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП як ще одного інструмента космічного проекту «Аерозоль-UA». Поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних каналів з полем зору $60 \times 60^\circ$. Три канали є поляризаційними, кожний з яких дозволяє проводити поляриметричні вимірювання трьох параметрів Стокса I, Q, U в центральних довжинах хвиль $\lambda\lambda = 410, 555, 865$ нм зі спектральними півширинами $FWHM = 20$ нм. Два канали МСІП призначені для фотометричних вимірювань у восьми спектральних діапазонах з центральними довжинами хвиль $\lambda\lambda = 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865$ і 910 нм та півширинами $FWHM = 20...40$ нм.

Спільні вимірювання приладами «СканПол» та МСІП з борту орбітального апарату виконуються таким способом, що поле зору сканера проходить центральною частиною поля зору іміджера. Сканувальний поляриметр «СканПол» за одне сканування оглядає кутову дистанцію вздовж траєкторії польоту від -60° до $+50^\circ$ та має миттєве поле зору 0.5° , що у проекції на земну поверхню з висоти 700 км відповідає значенням довжини сканування вздовж проекції орбіти на поверхню Землі 2300 км, ширина поля зору сканування 6 км. При цьому кіль-

кість спостережних кутів одиничної площадки складає близько 220.

Поле зору поляриметра МСІП охоплює $+30^\circ \dots -30^\circ$ вздовж та упоперек траєкторії польоту, що відповідає площі $780 \times 780 \text{ км}^2$ у проекції на земну поверхню. Просторова роздільна здатність МСІП складає від 3 км в надирі до 5 км на краю поля зору.

Для вирішення наукових задач, пов'язаних з визначенням фізичних характеристик аерозолів та їхнього просторового розподілу в земній атмосфері, МСІП повинен мати щонайменше вісім спектральних діапазонів, у трьох з яких можливе проведення поляриметричних вимірювань. Основні довжини хвиль та відповідні шукані характеристики аерозолів представлено у таблиці. Символом Р зазначено можливість проведення поляриметричних вимірювань.

ОПТИЧНА СХЕМА ІМІДЖЕРА-ПОЛЯРИМЕТРА МСІП

Інтенсивність зображення об'єкта, який досліджується у поляризованому випромінюванні з використанням засобів зображувальної Стокс-поляриметрії має найбільшу інформативність у порівнянні із звичайною фотометрією об'єкта [23]. Параметри Стокса не можуть бути виміряні безпосередньо, вони обчислюються з розв'язку системи [23]:

$$S(x, y) = \begin{bmatrix} S0(x, y) \\ S1(x, y) \\ S2(x, y) \\ S3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(x, y) + I_{90}(x, y) \\ I_0(x, y) - I_{90}(x, y) \\ I_{45}(x, y) - I_{135}(x, y) \\ I_{RS}(x, y) - I_{LC}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}, I_{RS}, I_{LS}$ — відповідно інтенсивності випромінювання з вертикальною, горизонтальною поляризаціями та з поляризаціями під кутами 45° і -45° , а також з право- та лівоциркулярною поляризацією, виміряні безпосередньо фотометричним методом. Інтенсивності $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$ можуть бути виміряні за допомогою лінійних поляризаторів, а I_p, I_l — за допомогою чвертьхвильової пластинки та лінійного аналізатора. Звичайно $S0 \dots S3 = (I, Q, U, V)$, тоді кут лінійної поляризації $AOLP$ та ступінь лінійної поляризації $DOLP$ можна розрахувати наступним чином:

$$DOLP = p(q^2 + u^2)^{1/2},$$

$$AOLP = v = 0.5 \arctg(u/q),$$

де $q = Q/I$ та $u = U/I$ — нормалізовані параметри Стокса вхідного випромінювання.

Зображувальна поляриметрія звичайно дає можливість визначати одночасно параметри вектора Стокса (SFSIP — Snapshot full-Stokes imaging polarimetry) і є потужним інструментом аналізу параметрів вектора Стокса для більшості об'єктів спостережень (поверхня Землі, атмосфера), включаючи нерухомі та рухомі об'єкти в реальному масштабі часу, що дає можливість уникнути тимчасових помилок реєстрації [23].

Одним з видів SFSIP-поляриметрів є поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання по апертурі (DoAP) [11, 16, 19]. В нашій роботі ми зосереджені на розробці специфічного методу побудови поляриметра DoAP. В запропонованому нами поляриметрі просторові варіації стану поляризації модулюються за допомогою чотирьох або більше субапертур з різними поляриметричними конфігураціями модуляцій. Така конфігурація дозволяє одночасно визначати три параметри вектора Стокса.

У роботі [20] авторами було запропоновано концепцію побудови системи зображувального

Спектральні діапазони каналів МСІП та їхні характеристики

Номер каналу	Центральна довжина хвилі, нм (півширина, нм)	Параметри, що визначаються
1	410 (20) Р	Поглинання аерозолем та моніторинг сажі (black carbon)
2	443(20)	Поглинання аерозолем та висота аерозольного шару
3	470 (20)	Параметри аерозолю
4	490 (20)	Аерозоль, альbedo поверхні, оптична товщина хмар, показник відбиття від хмар
5	555 (20) Р	Альbedo поверхні
6	670 (20)	Параметри аерозолю
7	865 (40) Р	Рослинність, аерозолі, хмари, особливості поверхні
8	910 (20)	Водяна пара, корекція впливу атмосфери

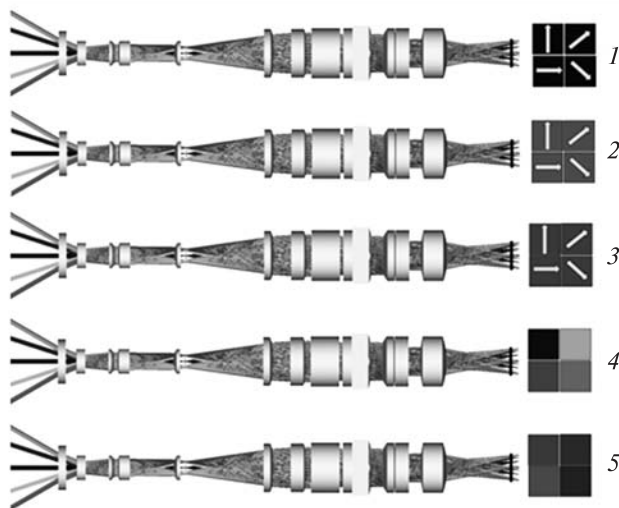


Рис. 1. Схематичне представлення каналів МСІП та принцип побудови зображень: 1 — поляризаційний канал (0° , 45° , 90° , 135°), довжина хвилі 410 нм, півширина 20 нм, 2 — поляризаційний канал (0° , 45° , 90° , 135°), довжина хвилі 555 нм, 3 — поляризаційний канал (0° , 45° , 90° , 135°), довжина хвилі 865 нм, 4 — фотометричний канал с довжинами хвиль 410, 443, 470, 490 нм, 5 — фотометричний канал с довжинами хвиль 555, 670, 865, 910 нм

астрономічного поляриметра, що дозволяє проводити вимірювання складових вектора Стокса одночасно в широкому полі зору і без обмежень по відносному отвору системи. Таку схему було обрано як прототип поляриметра МСІП. Загалом МСІП складається з п'яти оптичних каналів, три з яких поляризаційні, а два — фотометричні (див. таблицю).

На рис. 1 наведено схематичне зображення каналів яке ілюструє принцип побудови зображень у фокальній площині поляриметра. З фотометричної точки зору всі канали МСІП розділено на дві групи — короткохвильові (400...500 нм) і довгохвильові (500...920 нм). Камери обох груп подібні та максимально уніфіковані.

У склад кожного із поляризаційних оптичних каналів входять: ширококутний вхідний об'єктив для формування заданого поля зору на польовій діафрагмі, коліматор, що формує систему паралельних променів для проходження блоку «поляроїд — фільтр — призми», композитний поляризаційний елемент, що розділяє вихідну знічку на чотири сегменти, фільтр для виділення робочої до-

вжини хвилі каналу, ахроматичні призми для розведення чотирьох зображень поля зору, камерний об'єктив для формування зображень поля зору.

У складі кожної оптичної системи фотометричного каналу також є складовий спектральний фільтр, що виконує ту ж функцію — розділює вихідну знічку на чотири сегменти.

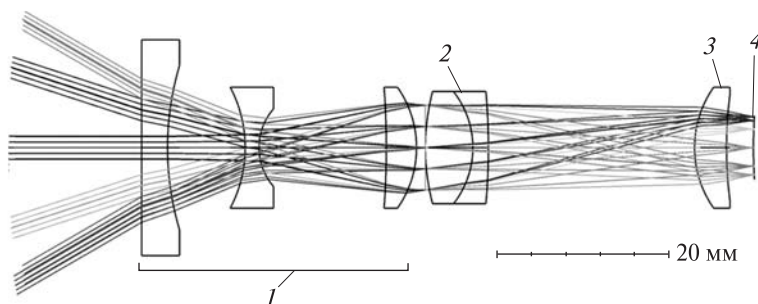
Вхідну частину каналів МСІП (рис. 2) сформовано за класичною схемою ширококутного інвертованого телефотооб'єктива. Вона складається з двох частин: обернена система Галілея та власне об'єктив з апертурною діафрагмою біля нього.

Система Галілея розширює поле зору, а її потужний від'ємний компонент формує негативну кривину поля всієї системи. Завдяки цьому конструкція камерного об'єктива може бути спрощена до двокомпонентного, у відповідності із рекомендаціями роботи [3].

Важливою особливістю системи МСІП є не повна корекція хроматизму. Згідно з теоремою Слюсарєва [3] у системі значної довжини, тобто з розсунутими компонентами, обидва хроматизми (положення і збільшення) можуть бути виправлені лише при корекції всіх компонентів, тобто потрібне значне ускладнення системи. Але поляриметр МСІП має працювати у вузьких спектральних каналах, тому для кожного каналу хроматизм збільшення не впливає на якість зображення. Ця обставина дає змогу суттєво спростити систему. Такий прийом передбачає появу хроматичної дисторсії, різної для різних каналів, але вона невелика (до 140 мкм) і її можна програмно компенсувати при подальшій обробці.

Згідно з формулою (1) для аналізу лінійної поляризації необхідно виконати чотири вимірювання інтенсивностей випромінювання, що пройшли через аналізатори поляризації. У загальному випадку можливі різні варіанти реалізації таких аналізаторів. Перший з них — застосування пари двопробових поляризаційних призм, оптичні осі яких розміщені під кутом 45° і заповнюють сектори 1—2 і 3—4 відповідно. Вони мають ефективність, близьку до 100 %. Така призма (Wedged double Wollaston) була запропонована в роботі [17]. Аналогічні системи описані в роботах [15, 19], де, крім масиву призм Волластона, як аналізатор по-

Рис. 2. Ширококутний вхідний об'єктив: 1 — система Галілея, 2 — об'єктив, 3 — колектив, 4 — діафрагма поля зору



ляризації застосовуються ще й чвертьхвильові пластинки для визначення всіх параметрів Стокса. Однак власна дисперсія призми вимагає введення додаткових компенсаційних клинів і не може дати якісне зображення у великому полі зору і широкому спектральному діапазоні.

Слід зазначити, що дисперсія призми є різною для двох ортогональних напрямків поширення світла, що призводить до неідентичності зображень. В іншому варіанті такого аналізатора поляризації використовуються тонкі поляризаційні плівки. У порівнянні з двопробовими поляризаційними призмами Волластона плівки мають гірший коефіцієнт пропускання, який зменшується до 47 % в діапазоні 420...800 нм. Однак при широкому полі зору і врахуванні виньєтування косих польових променів на межі дотику призми плівки є кращими, ніж двопробові поляризаційні призми, зокрема у зв'язку з меншою товщиною.

У запропонованій схемі використовується секторний поляризатор, що складається з чотирьох плівкових поляризаторів з позиційними кутами 0° , 45° , 90° і 135° . Схему такого секторного поляризатора, встановленого поблизу вихідної зіниці оптичного каналу МСІП, показано на рис. 3.

Ми розробили секторний поляризатор на основі комерційних поляризаційних плівок [1]. Вказані плівки були орієнтовані з позиційними кутами 0° , 45° , 90° , 135° , а потім заклеєні між двома захисними вікнами (див. рис. 3, а та б). Ступінь затемнення того чи іншого сектора ілюструє роботу поляризаційного елемента. Повне затемнення у секторі відповідає випадку, коли вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно перпендикулярні, світлий сектор — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна

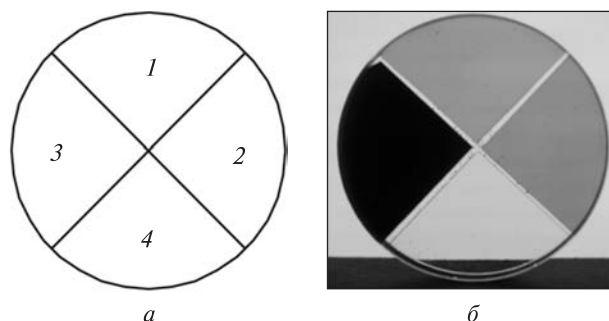


Рис. 3. Секторний поляризатор іміджера-поляриметра: а — орієнтація поляризаційних елементів (1 — 0° , 2 — 90° , 3 — 45° , 4 — 135°), б — зображення складового поляроїда на основі поляризаційних плівок

вісь поляроїда взаємно паралельні.

Для розведення чотирьох зображень спостережуваного об'єкта використовується система відхиляючих призми, ахроматизованих для діапазону 400...900 нм. Система складається з двох склеєних клинів зі стекол К108-Ф101 у кожному каналі. З метою досягнення максимальної технологічності виробництва у поляриметрі МСІП усі канали були уніфіковані для обох діапазонів, 500...900 нм та 400...500 нм. В результаті усі канали МСІП відрізняються лише останньою склеюючою камерного об'єктива.

Останній елемент каналу МСІП — камерний об'єктив — проектує рознесені зображення польової діафрагми з коефіцієнтом збільшення близько ~ 1 у фокальну площину. Загальний розмір чотирьох зображень становить близько 15×15 мм, що і визначає необхідний розмір приймача з розміром пікселя 7...10 мкм.

КОНСТРУКЦІЯ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ МСІП

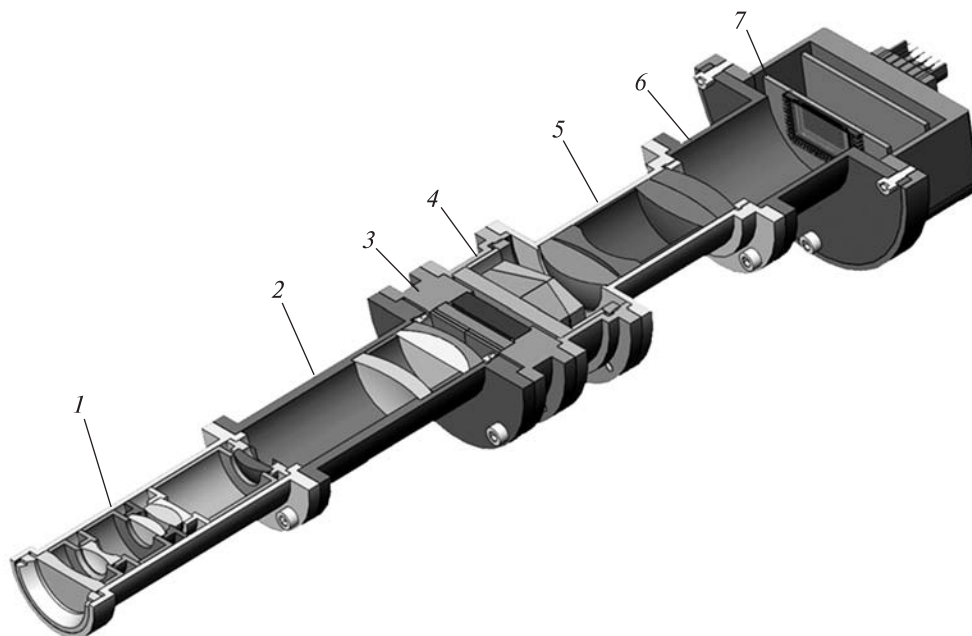


Рис. 4. Загальний вигляд оптичного каналу мультиспектрального іміджера-поляриметра (поляриметричний канал 555 нм) у розрізі: 1 — вхідний об'єктив, 2 — коліматор, 3 — поляризатор та фільтр, 4 — блок клинів, 5 — камерний об'єктив, 6 — проміжний фланець, 7 — ПЗЗ-камера

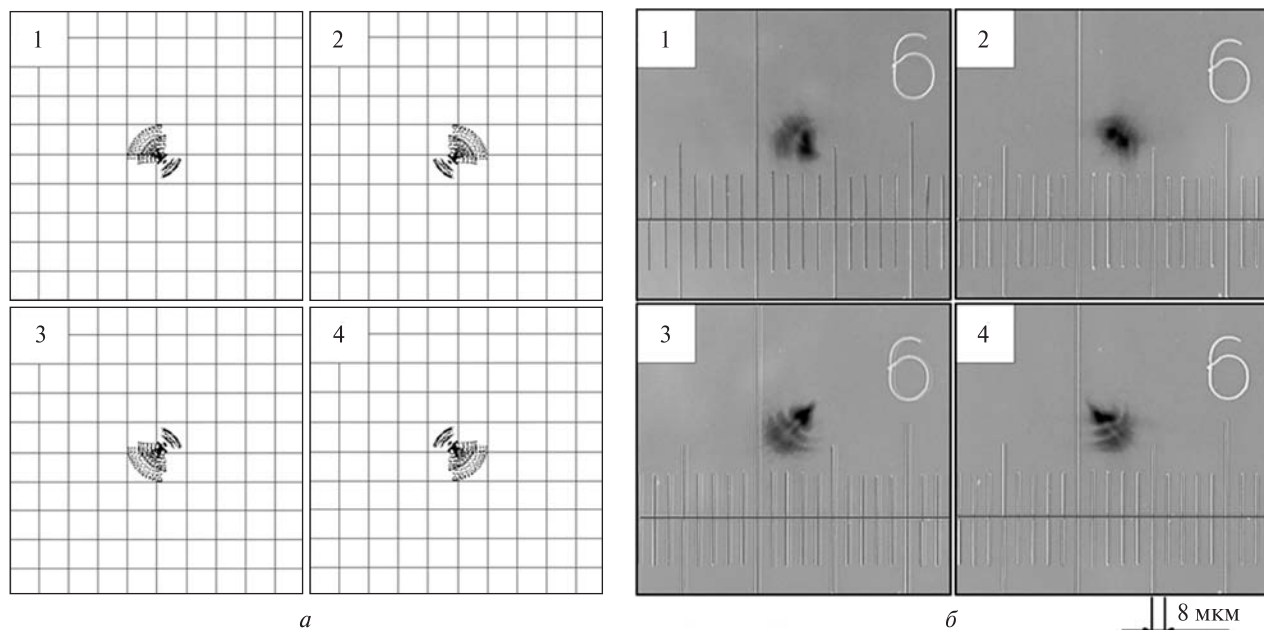


Рис. 5. Теоретичні (а) та реальні (б) плями розсіювання осьової точки для кожного із чотирьох (1, 2, 3, 4) субканалів оптичного каналу 555 нм. Одна поділка на шкалі відповідає розміру 8 мкм

У зв'язку з необхідністю уніфікації оптичних схем каналів поляриметра МСІП як коротко- так і довгохвильового діапазонів усі канали мають майже однакову конструкцію, яка відрізняється лише деякими відстанями між лінзами. Конструктивно поляриметр МСІП є сукупністю вузлів, показаних на рис. 4. Ці вузли з'єднуються за допомогою фланців. Габарити одного каналу: довжина — 302 мм, найбільший діаметр — 86 мм (фланець камери), сумарна маса усіх п'яти каналів — 4 кг. Загальний вигляд конструкції окремого каналу показано на рис. 4.

Виходячи з розробленої та змодельованої конструкції мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП, було виготовлено один спектральний канал, який пройшов перші необхідні етапи перевірки основних характеристик. До основних характеристик, що були перевірені, можна віднести: якість плями розсіювання для кута поля зору 0° (осьова точка); правильність розташування зображень на приймачі випромінювання та відсутність накладень зображень, що формуються суміжними каналами; загальна якість зображення по полю зору.

На рис. 5, а представлено розрахункові плями розсіювання кожного із чотирьох субканалів поляриметричного каналу 555 нм. Асиметричність плями розсіювання пов'язана головним чином з тим, що для кожного субканалу вона формується за допомогою $1/4$ зіниці приладу. Згідно з вимірною функції концентрації енергії у плямі розсіювання діаметр розрахункової плями розсіювання становить близько 28 мкм при концентрації енергії 90 %. Реальні розміри плями розсіювання (рис. 5, б), одержані при дослідженні оптичного каналу не перевищують 30 мкм. Для досліджень каналу МСІП ми використовуємо камеру SBIG STL-1301E.

Також слід відмітити, що при більш детальному дослідженні периферійних зон зображення накладення сусідніх зображень немає, але останнє буде досліджено детальніше у подальшому випробуванні каналів МСІП.

ВИСНОВКИ

У роботі представлено результати розробки мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП

для досліджень мікрофізичних характеристик аерозолів в атмосфері в космічному проекті «Аерозоль-UA». Наведено основні технічні вимоги до загальної оптичної схеми поляриметра МСІП. Запропоновано власну концепцію оптичної схеми іміджера-поляриметра, яка базується на принципі поділу вхідного зображення на чотири квазіідентичні вторинні зображення. Такий підхід дозволяє уніфікувати оптичну схему каналів поляриметра, яка дозволяє трансформувати поляризаційний канал у фотометричний канал з чотирма субканалами із різними спектральними діапазонами. Така трансформація виконується заміною секторного поляризатора на секторний фільтр з чотирма різними довжинами хвиль у кожному секторі. Загалом поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних блоків, три з яких поляризаційні, два інші — фотометричні. Проведено розрахунок та оптимізацію кожної із оптичних схем та моделювання механічної конструкції поляриметра. Виготовлено, складено та від'юстовано експериментальний зразок одного з оптичних каналів поляриметра МСІП. Попередні результати дослідження продемонстрували збіг теоретичних та експериментальних розрахунків оптичної схеми каналів МСІП. Слід зауважити, що дослідження проводилися без поляризаційного елемента.

Подальші етапи будуть пов'язані з лабораторним дослідженням та калібруванням поляризаційних характеристик МСІП, зокрема оцінюванням інструментальної поляризації та визначення можливостей її врахування.

Роботу виконано за фінансової підтримки проекту «Аерозоль-UA» (NAS) Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2017 рр., проекту 16БФ051-02 Київського національного університету імені Тараса Шевченка, гранту Ф73/36-2017 Державного фонду фундаментальних досліджень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Синявський І. І. Розробка поляризатора зображувального поляриметра на основі поляризаційних плівок // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 4. — С. 19—23.

2. Синявський І. І., Міліневський Г. П., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Данилевський В. О., Розенбуш В. К., Бовчалоук А. П., Лукенюк А. А., Шимків А. П., Міщенко М. І. Методика, апаратне забезпечення та валідація супутникових досліджень атмосферного аерозолі: перші результати підготовки до космічного експерименту «Аерозоль-УА» // Космічна наука та технологія. — 2015. — **21**, № 3. — С. 9—17.
3. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1975. — 640 с.
4. Смердов Е. И., Вайсера М. В., Добрушина М. Г., Ка-вун В. В. Особенности интеграции микроспутнико-вой платформы «YuzhSat» с различными типами по-лезной нагрузки // 17 Укр. конф. по космич. исслед.: Сб. тез. докл. — Одесса, 2017. — С. 145.
5. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I. Rainbow Fourier transform // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2012. — **113**. — P. 2521—2535.
6. Bréon F. M., Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 1879—1882.
7. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multiangle polarimetric satellite observations // Atmos. Meas. Technol. — 2011. — **4**. — P. 975—1018.
8. Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Herman M., Fuertes D., Ducos F., Torres B., Derimian Y., Huang X., Lopatin A., Chaikovsky A., Aspetsberger M., Federspiel C. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere // SPIE Vol. Newsroom. — 2014. — doi: 10.1117/2.1201408.005558.
9. Hansen J., Rossow W., Carlson B., Lacis A., Travis L., Del Genio A., Fung I., Cairns B., Mishchenko M., Sato M. Low cost long term monitoring of global climate forcings and feedbacks // Climatic Change. — 1995. — **31**. — P. 247—271.
10. Kokhanovsky A. A., Davis A. B., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O. P., Sano I., Mukai S., Rozanov V. V., Litvinov P., Lapyonok T., Kolomiets I. S., Oberemok Y. A., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F. A., Rietjens J., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multiangle spectro-polarimetric frontier // Earth-Sci. Rev. — 2015. — **145**. — P. 85—116.
11. Llull P., Myhre G., Pau S. Lens array Stokes imaging polarimeter // Meas. Sci. Technol. — 2011. — **22**. — 065901
12. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskiy I., Mishchenko M., Rosenbush V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere // Acta astronaut. — 2016. — **123**. — P. 292—300.
13. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2007. — **88**. — P. 677—691.
14. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Liu L., Lacis A., Cairns B., Travis L. Toward unified satellite climatology of aerosol properties: what do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us? // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2009. — **110**. — P. 402—408.
15. Mu T., Zhang C., Liang R. Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array // J. Opt. — 2015. — **17** (12). — 125708.
16. Mu T., Zhang C., Li Q., Liang R. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters // Opt. Express. — 2015. — **23**. — P. 10822—10835.
17. Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1997. — **123**, N 3. — P. 589—592.
18. Perreault J. D. Triple Wollaston-prism complete-Stokes imaging polarimeter // Opt. Lett. — 2013. — **38** (19). — P. 3874—3877.
19. Pezzaniti J. L., Chenault D. B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter // Proc. SPIE. — 2005. — **5888**. — 58880V.
20. Sinyavskii I. I., Ivanov Yu. S., Vid'machenko A. P. Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes // J. Opt. Technol. — 2013. — **80** (9). — P. 545—548.
21. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., Dubovik O., Ducos F., François P., Goloub P., Herman M., Lifermann A., Waquet F. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission // Atmos. Meas. Technol. — 2011. — **4**. — P. 1383—1395.
22. Torres B., Dubovik O., Fuertes D., Schuster G., Cachorro V. E., Lapyonok T., Goloub P., Blarel L., Barreto A., Mallet M., Toledano C., and Tanré D. Advanced characterisation of aerosol size properties from measurements of spectral optical depth using the GRASP algorithm // Atmos. Meas. Technol. — 2017. — **10**. — P. 3743—3781.
23. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Appl. Opt. — 2006. — **45** (22). — P. 5453—5469.

Стаття надійшла до редакції 09.01.18

REFERENCES

1. Vidmachenko A. P., Ivanov Yu. S., Syniavskiy I. I. The development of the imaging polarimeter's polarizer on the

- basis of the polarizing film. *Kosm. nauka tehnol.*, **21** (4), 19–23 (2015) [in Ukrainian].
2. Syniavskiy I. I., Milinevsky G. P., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. H., Danylevsky V. O., Rozenbush V. K., Bovchaliuk A. P., Lukenyuk A. A., Shymkiv A. P., Mishchenko M. I. Methodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the AEROSOL-UA space experiment development. *Kosm. nauka tekhnol.*, **21** (3), 9–17 (2015) [in Ukrainian].
 3. Sliusarev G. G. Raschet opticheskikh system [Design of optical system]. 640 p. (Mashinostroenie, L., 1975) [in Russian].
 4. Smerdov E. I., Vajsero M. V., Dobrushyna M. G., Kavun V. V. Osobennosti integracii mikrosputnikovoj platformy «YuzhSat» s razlichnymi tipami poleznoj nagruzki [Features of the integration of the «YuzhSat» micro satellite platform with various types of payload] *17th Ukrainian Conference on Space Research: Abstracts*, P. 145 (Odesa, 2017) [in Russian].
 5. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I. Rainbow Fourier transform. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **110**, 402–408 (2009).
 6. Bréon F. M., Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1879–1882 (1998).
 7. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanr D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced re-trieval of aerosol properties from spectral multi-angle polari-metric satellite observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 975–1018 (2011).
 8. Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Herman M., Fuertes D., Ducos F., Torres B., Derimian Y., Huang X., Lopatin A., Chaikovsky A., Aspetsberger M., Federspiel C. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere. *SPIE Vol. Newsroom*, doi:10.1117/2.1201408.005558 (2014).
 9. Hansen J., Rossow W., Carlson B., Lacis A., Travis L., Del Genio A., Fung I., Cairns B., Mishchenko M., Sato M. Low cost long term monitoring of global climate forcings and feedbacks. *Climatic Change*, **31**, 247–271 (1995).
 10. Kokhanovsky A. A., Davis A. B., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O. P., Sano I., Mukai S., Rozanov V. V., Litvinov P., Lapyonok T., Kolomiets I. S., Oberemok Y. A., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F. A., Rietjens J., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multi-angle spectro-polarimetric frontier. *Earth-Sci. Rev.*, **145**, 85–116 (2015).
 11. Llull P., Myhre G., Pau S. Lens array Stokes imaging polarimeter. *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 065901 (2011).
 12. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskiy I., Mishchenko M., Rosenbush V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, **123**, 292–300 (2016).
 13. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission. *Bull. Amer. Meteorological Soc.*, **88**, 677–691 (2007).
 14. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Liu L., Lacis A., Cairns B., Travis L. Toward unified satellite climatology of aerosol properties: what do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us?. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **110**, 402–408 (2009).
 15. Mu T., Zhang C., and Liang R. Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array. *J. Opt.*, **17** (12), 125708 (2015).
 16. Mu T., Zhang C., Li Q., and Liang R. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters. *Opt. Express*, **23**, 10822–10835 (2015).
 17. Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, **123** (3), 589–592 (1997).
 18. Perreault J. D. Triple. Wollaston-prism complete-Stokes imaging polarimeter. *Opt. Lett.*, **38** (19), 3874–3877 (2013).
 19. Pezzaniti J. L., Chenault D. B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter. *Proc. SPIE*, **5888**, 58880V (2005).
 20. Sinyavskii I. I., Ivanov Yu. S., Vid'machenko A. P. Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes. *J. Opt. Technol.*, **80** (9), 545–548 (2013).
 21. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., Dubovik O., Ducos F., François P., Goloub P., Herman M., Lifermann A., Waquet F. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission. *Atmos. Meas. Technol.*, **4**, 1383–1395 (2011).
 22. Torres B., Dubovik O., Fuertes D., Schuster G., Cachorro V. E., Lapyonok T., Goloub P., Blarel L., Barreto A., Mallet M., Toledano C., Tanré D. Advanced characterisation of aerosol size properties from measurements of spectral optical depth using the GRASP algorithm. *Atmos. Meas. Technol.*, **10**, 3743–3781 (2017).
 23. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote

sensing applications. *Appl. Opt.*, **45** (22), 5453–5469 (2006).

Received 09.01.18

*І. І. Синявський*¹, *Ю. С. Іванов*¹,
*М. Г. Сосонкін*¹, *Г. П. Міліневський*^{1,2,3}, *Г. В. Кошман*¹

¹ Главная астрономическая обсерватория
Национальной академии наук Украины, Киев,
Украина

² Международный центр науки будущего,
Цзилинский университет, Чанчунь, Китай

³ Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченка, Киев, Украина

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ИМИДЖЕР-ПОЛЯРИМЕТР КОСМИЧЕСКОГО ПРОЕКТА «АЭРОЗОЛЬ-УА»

Рассмотрен процесс создания мультиспектрального имиджера-поляриметра (МСИП), как одного из инструментов космического проекта «Аэрозоль-УА». Назначением поляриметра МСИП является изучение глобального распределения физических свойств аэрозольных частиц и облачных образований в атмосфере Земли по измерениям поляризационных и спектральных характеристик рассеянного солнечного излучения. Рассмотрены основные характеристики МСИП, необходимые для проведения эксперимента, предложено построение оптической схемы каналов поляриметра, которая позволяет определять линейную поляризацию излучения и проводить фотометрические измерения. Приведены результаты испытания экспериментального образца одного из оптических каналов имиджера-поляриметра и проведения и анализ его характеристик.

Ключевые слова: аэрозоли, изображающий поляриметр, космический эксперимент.

*I. I. Syniavskiy*¹, *Yu. S. Ivanov*¹,
*M. G. Sosonkin*¹, *G. P. Milinevsky*^{1,2,3}, *G. V. Koshman*¹

¹ Main Astronomical Observatory, National Academy
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² International Center of Future Science, Jilin University,
Changchun, China

³ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv,
Ukraine

MULTISPECTRAL IMAGER-POLARIMETER OF THE SPACE PROJECT AEROSOL-UA

Aerosols are the least studied components of the atmosphere that is resulting in uncertainty in the assessment of the impact of aerosols on the radiative balance of the Earth atmosphere. Moreover, information on the global distribution of anthropogenic aerosols is sparse, which makes it extremely difficult to test and improve aerosol transport patterns in the atmosphere and progress in understanding the human impact on climate and the environment. Following the unsuccessful launch of the Glory mission in 2011, there was a gap in the existence of up-to-date aerosol orbital instruments, because launches of similar types of devices were scheduled for 2019 and later. This is one of the reasons that we consider a scientific space project with ScanPol aerosol scanning polarimeter and a wide-angle multispectral imager-polarimeter (MSIP) on board the spacecraft as a timely mission that will produce the required microphysical and chemical parameters by defining the indicator refraction index of the natural and anthropogenic aerosols. The main purpose of the MSIP is to carry out polarimetric and photometric measurements of scattered solar radiation in order to have information on the characteristics of aerosols, as well as to determine the influence of clouds on measurements with the ScanPol polarimeter. We propose the concept of the MSIP optical layout, which is based on the principle of splitting the input image into four quasi-identical secondary images. This approach allows us to unify the optical layout of polarimeter channels, which allows, in own turn, to transform the polarization channel into a photometric channel with four subchannels with different spectral ranges. This transformation is performed by replacing the sector polarizer with a sector filter with four different wavelengths in each sector. The MSIP consists of five optical channels with a field of view 60°×60°. The three channels are polarizing, each of which allows to perform polarimetric measurements of the three Stokes *I*, *Q*, *U* parameters at the central wavelengths of 410, 555, 865 nm with a spectral half-width of 20 nm FWHM. Two channels of MSIP are intended for photometric measurements in eight spectral bands with center wavelengths of 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865, and 910 nm with spectral half-widths of 20 to 40 nm FWHM. The calculation and optimization of each of the optical layouts and the modeling of the mechanical construction of the polarimeter are performed. An experimental sample of one of the optical channels of the MSIP has been manufactured, compiled and verified. The preliminary results demonstrate the convergence of theoretical and experimental data. It should be noted that the studies were conducted without a polarizing element. The next steps will be related to the laboratory testing and calibration of the MSIP polarization characteristics..

Keywords: aerosols, imaging polarimeter, space experiment.

А. В. Дудник^{1, 2}, И. В. Лазарев³, Е. В. Курбатов¹,
М. Ковалинский⁴, П. Подгурский⁴, Д. Сысисловский⁴

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина

³ Институт сцинтилляционных материалов Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

⁴ Отделение физики Солнца Центра космических исследований Польской академии наук, Вроцлав, Польша

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ОСЕЙ КРИСТАЛЛА *n*-ТЕРФЕНИЛА В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ МОНИТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ СОЛНЕЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА CHEMIХ

*Определена зависимость технического светового выхода малогабаритного детектора на основе монокристалла *n*-терфенила от направления осей его кристаллографической решетки. Исследования проведены для образца кристалла с размерами, сравнимыми с геометрическими параметрами антисовпадательного детектора монитора заряженных частиц высоких энергий ВРМ в солнечном рентгеновском спектрофотометре ChemiХ межпланетной космической миссии «Интергелиозонд». С этой целью изготовлен образец сцинтиллятора кубической формы и измерены его спектрометрические характеристики вдоль специфических осей кристалла с использованием β -частиц в диапазоне энергий от 482 до 1048 кэВ. Даны рекомендации о расположении полупроводникового фотоприемника относительно осей монокристалла *n*-терфенила при разработке и изготовлении монитора ВРМ спектрофотометра ChemiХ.*

Ключевые слова: миссия «Интергелиозонд», рентгеновский спектрофотометр ChemiХ, монитор заряженных частиц, сцинтилляционный детектор, монокристалл *n*-терфенила, β -частицы, энергетический спектр, технический световой выход.

ВВЕДЕНИЕ

Детекторная головка монитора заряженных частиц высоких энергий ВРМ (Background Particle Monitor) является составной частью солнечного спектрофотометра мягких рентгеновских лучей ChemiХ межпланетной космической миссии «Интергелиозонд» [2, 4, 6, 7]. Она содержит органический сцинтиллятор на основе монокристалла *n*-терфенила, оптически сочлененный с полупроводниковым мультипиксельным счетчиком оптических фотонов МРРС (рис. 1). По-

скольку легкие органические сцинтилляторы обычно имеют умеренный технический световой выход по сравнению с «тяжелыми» неорганическими сцинтилляторами, такими как Cs I(Tl), Na I(Tl), была изучена возможность получения наибольшей интенсивности люминесценции от малогабаритного монокристалла *n*-терфенила, имеющего размеры, сравнимые с геометрическими параметрами антисовпадательного детектора прибора ВРМ.

Отличительной особенностью органических монокристаллов является неравенство длин осей элементарной ячейки кристаллической решетки. Так, монокристалл *n*-терфенила имеет следующие значения параметров ячейки: вдоль оси

© О. В. ДУДНИК, И. В. ЛАЗАРЕВ, Е. В. КУРБАТОВ,
М. КОВАЛИНСКИЙ, П. ПОДГУРСКИЙ,
Д. СЫСИЛОВСКИЙ, 2018

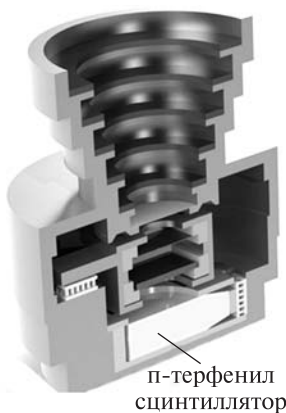


Рис. 1. Общий вид детекторной головки монитора частиц высоких энергий ВРМ в разрезе



Рис. 2. Блок-схема лабораторного стенда для исследования спектрометрических характеристик малогабаритных органических сцинтилляторов

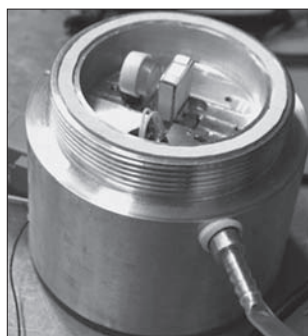


Рис. 3. Настольная малогабаритная камера низкого давления в открытом виде для измерения энергетических спектров β -частиц и характеристического рентгеновского излучения

a — 812 пм, **b** — 562 пм, **c** — 1362 пм [1]. В кристалле *n*-терфенила атомы в молекулах связаны ковалентной связью, однако между молекулами действует слабая вандерваальсова связь. Исследования его механических свойств показали, что для него характерна низкая твёрдость, малое значение модуля Юнга, большая склонность к хрупкому разрушению, отсутствие деформаци-

онного упрочнения, что отличает его от кристаллов с металлической, ковалентной и ионной связями [3]. Эксперименты показали наличие анизотропии микротвёрдости на плоскости базиса **a**, **b**; исследованный в работе [3] монокристалл имел увеличенную твёрдость вдоль кристаллографической оси **b**.

В данной работе исследуются сцинтилляционные свойства малогабаритного детектора заряженных частиц высоких энергий кубической формы на основе монокристалла *n*-терфенила вдоль его характеристических осей **a**, **b** и **c** с целью определения той оси кристаллографической решетки, вдоль которой наблюдается максимальный сцинтилляционный сигнал.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Малогабаритный сцинтиллятор кубической формы. Предварительно очищенный методом зонной плавки *n*-терфенил, активированный 1,4дифенил-1,3-бутадиеном, был использован для выращивания монокристалла методом Бриджмена. Количество 1,4дифенил-1,3-бутадиена соответствовало 0.3 % от массы *n*-терфенила, которым была заполнена ростовая ампула. Увеличение количества активатора, которое отличается от обычно применяемого количества (0.1 % от массы *n*-терфенила) [1], позволяет повысить значения технического светового выхода для монокристаллов, полученных из нижней половины выращенного слитка (були) [5]. Из этой части були был вырезан цилиндр толщиной 6 мм в направлении, перпендикулярном к линии роста монокристалла, совпадающей с осью **c** кристаллографической решетки. В направлении осей **a** и **b** цилиндр был разрезан на кубические образцы с линейными размерами $6 \times 6 \times 6$ мм³. Ориентирование кристалла проводилась с помощью лазера, излучающего в красной области оптического спектра. После разрезки цилиндра и предварительной полировки граней кубического образца было осуществлено еще одно ориентирование кристалла, в ходе которого определялись и были отмечены кристаллографические оси.

Ориентированный вдоль оси кубический образец был отшлифован, грани полированы, все поверхности упакованы светоотражающим диф-

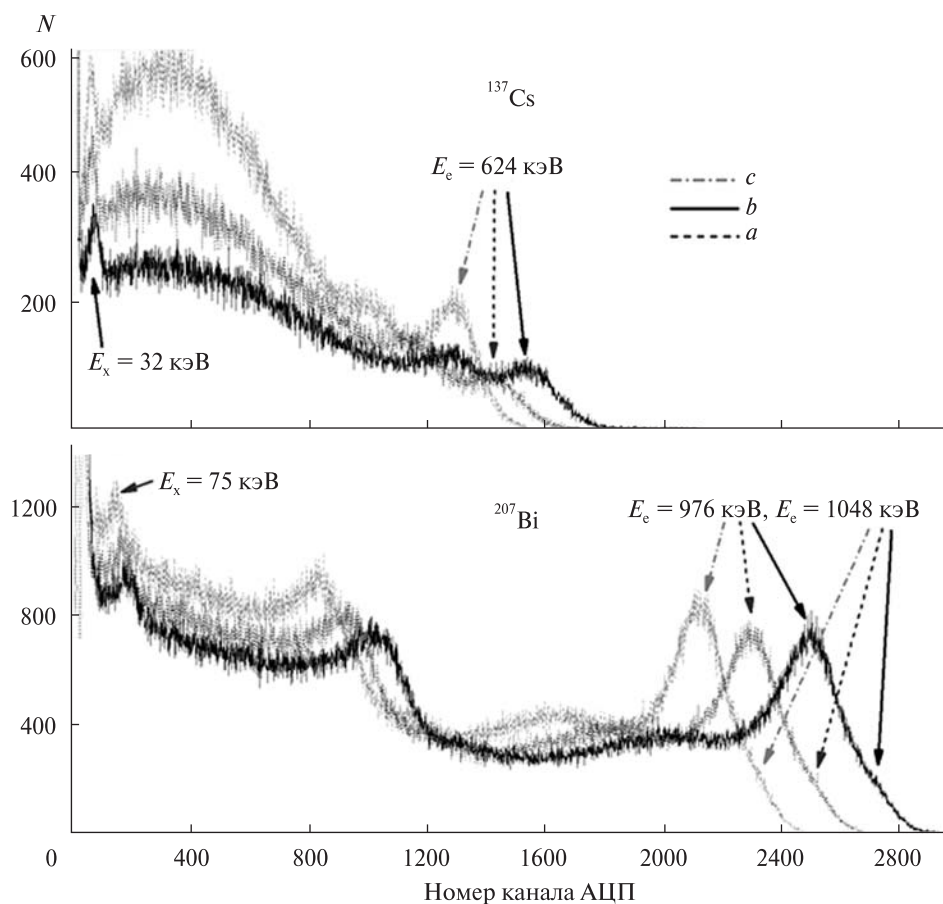


Рис. 4. Энергетические спектры β -частиц и характеристического рентгеновского излучения от изотопов ^{137}Cs и ^{207}Bi в конфигурации № 1 взаимного расположения источников излучений и чувствительной площади фотоприемника

фузным слоем специального состава, не позволяющим выходить вспышкам света из объема сцинтиллятора, возникающим во время прохождения заряженных частиц высоких энергий.

Лабораторный стенд. На рис. 2 представлена схема блок-схема лабораторного стенда для проведения эксперимента по исследованию спектрометрических характеристик малогабаритных кубических органических сцинтилляторов с использованием кремниевого фотоэлектронного умножителя (MPPC — Multi Pixel Photon Counter) производства «Хамаматсу Фотоникс» в качестве высокочувствительного полупроводникового фотоприемника. В качестве источника электронов с энергиями 482, 554, 624, 976 и 1048 кэВ были использованы радиоактивные изотопы ^{137}Cs и ^{207}Bi .

На фотоприемнике с общей активной площадью $S_{\text{MPPC}} = 6 \text{ мм}^2$, размером каждого пикселя $S_p = 25 \times 25 \text{ мкм}^2$ и суммарным количеством пикселей $n_{\text{MPPC}} = 57600$ было установлено напряжение перенапряжения $U_{ov} = 3.5 \text{ В}$, при котором коэффициент усиления фотодетектора равнялся $G_{\text{MPPC}} = 5.12 \cdot 10^5$, и эффективность детектирования фотонов составляла $PDE_{\text{MPPC}} = 37.5 \%$. Измерения проводились при стабилизированной температуре $T = 15^\circ \text{C}$ и пониженном атмосферном давлении $P \approx 0.1 \text{ бар}$ с использованием настольной малогабаритной камеры (рис. 3) с целью избежать осаждения влаги на чувствительную поверхность фотодетектора. Сигнал с выхода MPPC поступал на вход зарядочувствительного предварительного усилителя (ЗЧПУ),

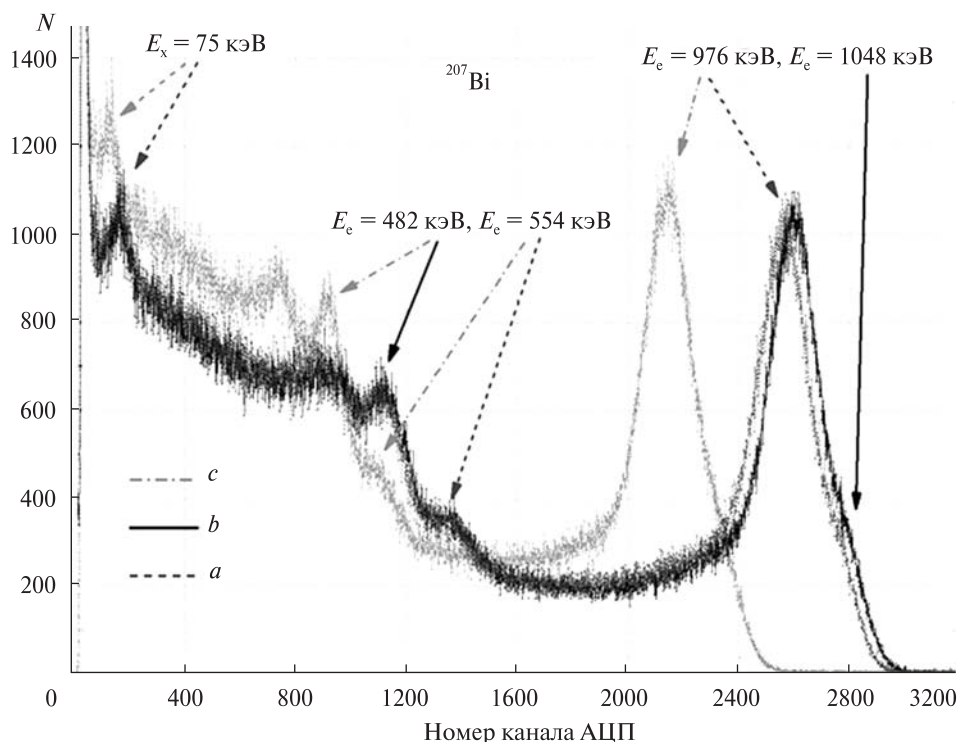


Рис. 5. Энергетические спектры β -частиц и характеристического рентгеновского излучения от изотопов ^{207}Bi в конфигурации № 2 взаимного расположения источников излучений и чувствительной площади фотоприемника

усиливался и формировался до уровня, необходимого для цифровой обработки с использованием 12-разрядного ядерно-физического спектрометрического АЦП и специального программного обеспечения. В зависимости от положения кристалла и радиоактивных изотопов по отношению к плоскости фотодетектора накапливались энергетические спектры β -частиц и проводился анализ амплитуд и энергетических разрешений моноэнергетических линий электронов и характеристического рентгеновского излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

В первой серии экспериментов (конфигурация № 1) радиоактивные изотопы были расположены на поверхности одной из поверхностей сцинтилляционного детектора таким образом, что траектории β -частиц были преимущественно параллельны плоскости фотодетектора.

На рис. 4 представлены энергетические спектры β -частиц и характеристического рентгеновского излучения от радиоактивных изотопов ^{137}Cs и ^{207}Bi , зарегистрированные вдоль кристаллографических осей **a**, **b** и **c**. Заметна разница амплитуд сцинтилляционных сигналов, выраженных в номерах каналов АЦП, для каждой из моноэнергетических линий электронов и рентгеновского излучения с энергией $E_\gamma = 75$ кэВ.

Во второй серии экспериментов (конфигурация № 2) частицы испускались изотопами цезия и висмута перпендикулярно к плоскости фотодетектора. На рис. 5 показаны энергетические спектры β -частиц от источника конверсионных электронов ^{207}Bi и рентгеновского излучения с энергией $E_\gamma = 75$ кэВ, зарегистрированные вдоль трех осей монокристалла *n*-терфенила. Серия измерений конфигурации № 2 подтвердила высокую чувствительность и широкий динамический энергетический диапазон регистрации детекторной сборкой, состоящей из кубического

Таблица 1. Положение максимумов пиков (в каналах АЦП) и энергетические разрешения моноэнергетических линий при измерениях спектров частиц вдоль осей *a*, *b* и *c* кристаллографической решетки *n*-терфенила в конфигурации № 1 взаимного расположения источников излучений и чувствительной площади фотоприемника

E , кэВ	X_b , канал АЦП	R_b , %	X_d/X_b	R_d/R_b	X_c/X_b	R_c/R_b
32	Измерения не проводились					
75	163	44.60	0.98	1.12	0.79	1.11
482	1128	16.60	0.99	1.00	0.81	0.97
554	1358	14.14	0.99	1.07	0.81	1.05
624	Измерения не проводились					
976	2596	7.83	0.99	1.07	0.82	1.18
1048	2789	5.75	0.99	0.95	0.83	1.31

Таблица 2. То же для конфигурации № 2 взаимного расположения источников излучений и чувствительной площади фотоприемника

E , кэВ	X_b , канал АЦП	R_b , %	X_d/X_b	R_d/R_b	X_c/X_b	R_c/R_b
32	74	51.41	0.88	0.99	0.86	0.95
75	181	48.26	0.88	0.95	0.79	0.98
482	—	—	—	—	—	—
554	—	—	—	—	—	—
624	1546	14.31	0.92	1.04	0.84	0.94
976	2489	9.16	0.92	0.99	0.85	0.99
1048	2697	6.23	0.92	1.10	0.85	1.12

органического сцинтиллятора и кремниевого фотоэлектронного умножителя. Так, энергетический эквивалент шумов системы составил $E_{ш} \approx 13$ кэВ, сборка регистрировала релятивистские электроны с энергиями вплоть до $E_e \approx 1$ МэВ.

Для каждой из зарегистрированных энергий были определены номера каналов АЦП для максимумов в функциях Гаусса, которыми были аппроксимированы измеренные энергетические спектры. Одновременно были рассчитаны относительные энергетические разрешения. В качестве реперных значений были приняты номера каналов максимумов пиков и энергетические разрешения при регистрации спектров вдоль оси *b* кристаллографической решетки. Положение максимумов пиков и энергетические разре-

шения при регистрации пиков вдоль двух других осей (*a* и *c*) решетки были нормированы относительно оси *b*.

Результаты аппроксимаций и расчетов представлены в табл. 1 (конфигурация № 1) и табл. 2 (конфигурация № 2). Из обеих таблиц видно, что амплитуда сцинтилляционного сигнала, зарегистрированного вдоль оси *a* кристалла регулярно меньше на 2...12 % в зависимости от энергии частиц, чем амплитуда при измерениях вдоль оси *b*, и еще меньше (на 15...20 %) — вдоль оси *c*. При этом энергетические разрешения при измерениях вдоль оси *b* решетки незначительно выше, чем значения разрешений, полученные в результате набора и аппроксимации спектров вдоль двух других осей. Эта закономерность сохраняется преимущественно для конфигурации № 1.

ВЫВОДЫ

1. Наилучший технический световой выход малогабаритного сцинтилляционного детектора заряженных частиц на основе монокристалла *n*-терфенила правильной формы наблюдается при детектировании световых вспышек вдоль оси *b* его кристаллографической решетки.

2. Разница значений технического светового выхода, полученных вдоль различных осей решетки, может достигать величин 2...20 % в зависимости от энергии падающих заряженных частиц и характеристического рентгеновского излучения, а также конфигурации расположения источника ионизирующего излучения по отношению к плоскости фотодетектора.

3. При изготовлении антисовпадательного сцинтилляционного детектора монитора заряженных частиц высоких энергий ВРМ солнечного рентгеновского спектрофотометра ChemiX межпланетной космической миссии «Интергелиозонд» монокристалл *n*-терфенила должен быть ориентирован по отношению к активной площади фотоприемника с учетом проведенных экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по космическим исследованиям на 2017 год, Договор № 1.57.4.16 РИ НАН Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галунов Н. З., Семиноженко В. П. Радиолюминесценция органических конденсированных сред. Теория и применение. — К.: Наук. думка, 2015. — 464 с.
2. Дудник А. В., Курбатов Е. В., Зайцевский И. Л., Сильвестер Я., Сиарковский М., Ковалинский М., Подгурский П. Детектор энергичных частиц ДЧФ в составе солнечного рентгеновского фотометра ChemiX космической миссии «Интергелиозонд» // Радиофизика и радиоастрономия. — 2015. — **20**, № 3. — С. 247—260.
3. Мильман Ю. В., Галунов Н. З., Чугунова С. И., Лазарев И. В., Истомин Б. В., Запорожец О. И., Гончарова И. В. Изучение механических свойств кристаллических молекулярных сцинтилляторов *p*-терфенила методами индентирования // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2016. — **14**, № 3. — С. 461—476.
4. Dudnik O. V., Kurbatov E. V., Sylwester J., Siarkowski M., Podgórski P., Kowaliński M. Background Particle Monitor — a part of the solar X-ray spectrophotometer ChemiX: principles of the operation and construction // 15-а Укр. конф. з космічних досліджень (24—28 серпня 2015 р., Одеса): Абстракт. — Київ, 2015. — С. 80.
5. Galunov N. Z., Lazarev I. V., Martynenko E. V., Vashchenko V. V., Vashchenko E. V. Distribution coefficient of 1,4-diphenyl-1,3-butadiene in *p*-terphenyl single crystal and its influence on scintillation crystal light output // Mol. Cryst. and Liquid Cryst. — 2015. — **616**. — P. 176—186.
6. Kuznetsov V. D., Zelenyi L. M., Zimovets I. V., Anufreychik K., Bezrukikh V., Chulkov I. V., et al. The Sun and Heliosphere Explorer - The Interhelioprobe Mission // Geomagn. and Aeronomy. — 2016. — **56**, N 7. — С. 781—841.
7. Sylwester J., Siarkowski M., Bakala J., Szaforz Ż., Kowaliński M., Steślicki M., et al. Solar X-ray from 0.3 A.U.: The ChemiX Bragg Spectrometer on Interhelioprobe // Solar and Stellar Flares and their Effects on Planets (IAU S320) / Eds A. G. Kosovichev, S. L. Hawley, P. Heinzel. — Cambridge: University Press, 2016. — P. 442—446.

Стаття надійшла до редакції 04.01.18

REFERENCES

1. Galunov N. Z., Seminozhenko V. P. Radioluminescence of organic condensed media. Theory and application. K.: Nauk. Dumka, 2015. — 464 s.
2. Dudnik O. V., Kurbatov E. V., Zajtsevsky I. L., Sylwester J., Siarkowski M., Kowaliński M., Podgórski P. The BPD energetic particle detector as part of the Solar X-ray photometer ChemiX for the “Interhelioprobe” interplanetary mission. *Radio physics and radio astronomy*, **20** (3), 247—260 (2015) [in Russian].
3. Milman Yu. V., Galunov N. Z., Chugunova S. I., Lazarev I. V., Istomin B. V., Zaporozhets O. I., Goncharova I. V. The study of mechanical properties of *p*-terphenyl crystalline molecular scintillators by indentation method. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotechnologii*, **14** (3), 461—476 (2016) [in Russian].
4. Dudnik O. V., Kurbatov E. V., Sylwester J., Siarkowski M., Podgórski P., Kowaliński M. Background Particle Monitor — a part of the solar X-ray spectrophotometer ChemiX: principles of the operation and construction. *15th Ukrainian Conference on Space Research, 24—28 Aug., 2015, Odesa. Abstracts*. P. 80. (Kyiv, 2015).
5. Galunov N. Z., Lazarev I. V., Martynenko E. V., Vashchenko V. V., Vashchenko E. V. Distribution coefficient of 1,4-diphenyl-1,3-butadiene in *p*-terphenyl single crystal and its influence on scintillation crystal light output. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **616**, 176—186 (2015).
6. Kuznetsov V. D., Zelenyi L. M., Zimovets I. V., Anufreychik K., Bezrukikh V., Chulkov I. V. The Sun and Heliosphere Explorer — The Interhelioprobe Mission. *Geomagnetism and Aeronomy*, **56** (7), 781—841 (2016).
7. Sylwester J., Siarkowski M., Bakala J., Szaforz Ż., Kowaliński M., Steślicki M., et al. Solar X-ray from 0.3 A.U.: The ChemiX Bragg Spectrometer on Interhelioprobe. in *Book: “Solar and Stellar Flares and their Effects on Planets (IAU S320)”*, 2016. P. 442—446. Editors: A. G. Kosovichev, S. L. Hawley, P. Heinzel Cambridge University Press (2016), 470 p.

Received 04.01.18

О. В. Дудник^{1,2}, І. В. Лазарев³, Є. В. Курбатов¹,
М. Ковалінський⁴, П. Подгурський⁴, Д. Сьцісловський⁴

¹ Радіоастрономічний інститут Національної
академії наук України, Харків, Україна

² Харківський національний університет
ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

³ Інститут сцинтиляційних матеріалів
Національної академії наук України, Харків, Україна

⁴ Відділення фізики Сонця Центру космічних
досліджень Польської академії наук, Вроцлав, Польща

ДОЦІЛЬНІСТЬ ОРІЄНТУВАННЯ ОСЕЙ КРИСТАЛА *p*-ТЕРФЕНІЛУ У СЦИНТИЛЯЦІЙНОМУ ДЕТЕКТОРІ МОНІТОРА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК СОНЯЧНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА CHEMIX

Легкі органічні сцинтилятори мають помірний технічний світловий вихід у порівнянні з неорганічними сцинтиляторами. Для того щоб отримати максимальну інтенсивність люмінесценції від монокристалу *p*-терфенілу, ми використали відмінну рису органічних кристалів. Ця риса полягає в нерівності довжин осей елементарної комірки кристалічної решітки. Метою цієї роботи є вивчення сцинтиляційних властивостей малорозмірного детектора високоенергетичних заряджених частинок на основі монокристалу *p*-терфенілу вздовж його характеристичних осей **a**, **b** і **c**. Ми виготовили кубічний детектор з розмірами 6 × 6 × 6 мм, а також виміряли і обробили енергетичні спектри конверсійних електронів, що надходили від радіоактивних ізотопів ¹³⁷Cs та ²⁰⁷Bi. Як фотоприймач використовувався кремнієвий фотоелектронний помножувач з загальною активною площею 6 × 6 мм і з кількістю пікселів 57600. Вимірювання проведено при стабілізованій температурі $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і зниженому атмосферному тиску $P \approx 0.1$ бар. Ми проаналізували амплітуди і енергетичні роздільні здатності моноенергетичних електронних піків і характеристичного рентгенівського випромінювання. Було визначено, що амплітуда сцинтиляційного сигналу, зареєстрованого вздовж осі **a** кристалу, менша на 2...12 %, в залежності від енергії частинки, ніж амплітуда, виміряна вздовж осі **b**, та навіть менша на 15...20 % — вздовж осі **c**. Ми робимо висновки, що 1) найкращий технічний світловий вихід малорозмірного сцинтиляційного детектора, виробленого на основі монокристалу *p*-терфенілу правильної форми, досягається, коли світлові спалахи реєструються вздовж осі **b** його кристалографічної решітки; 2) під час виготовлення антиспівпадального детектора високоенергетичних заряджених частинок монітора BPM сонячного рентгенівського спектрофотометра ChemiX міжпланетної космічної місії «Інтергеліозонд» монокристал *p*-терфенілу має бути орієнтований по відношенню до активної площі фотодетектора з урахуванням представлених результатів експериментальних досліджень.

Ключові слова: місія «Інтергеліозонд», рентгенівський спектрофотометр ChemiX, монітор заряджених частинок, сцинти-

ляційний детектор, монокристал *p*-терфенілу, β -частинки, енергетичний спектр, технічний світловий вихід.

O. V. Dudnik^{1,2}, I. V. Lazarev³, E. V. Kurbatov¹,
M. Kowaliński⁴, P. Podgórski⁴, D. Ścisłowski⁴

¹ Institute of Radio Astronomy of the NAS Ukraine,
Kharkiv, Ukraine

² V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

³ Institute for Scintillation Materials
of the NAS Ukraine, Kharkiv, Ukraine

⁴ Solar Physics Division of the Space Research
Centre of the PAS, Wrocław, Poland

ADVISABILITY OF THE AXES ORIENTATION IN *p*-TERPHENYL CRYSTAL OF SCINTILLATION DETECTOR OF THE CHARGED PARTICLE MONITOR IN CHEMIX SOLAR X-RAY SPECTROPHOTOMETER

Lightweight organic scintillators have a moderate technical light yield as compared with inorganic scintillators. In order to obtain the highest luminescence intensity from *p*-terphenyl single crystal, we used the distinguishing feature of organic crystals. This feature is inequality of the axes lengths of the crystal lattice unit cell. The aim of this work is to study the scintillation properties of a small-sized detector of highly energetic charged particles based on the *p*-terphenyl single crystal along its characteristic axes **a**, **b**, and **c**. We have made a cubic-shaped detector with dimensions 6 × 6 × 6 mm as well as measured and processed the energy spectra of conversion electrons using radioactive isotopes ¹³⁷Cs and ²⁰⁷Bi. We used silicon photomultiplier with total active area 6 × 6 mm with the common number of pixels of 57600 as the photodetector. The measurements were conducted at a stabilized temperature of $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a depressed atmospheric pressure $P \approx 0.1$ Bar. We analyzed amplitudes and energy resolutions of monoenergetic electron peaks and characteristic X-ray radiation. We determined that the amplitude of the scintillation signal registered along the **a** axis of the crystal is less on 2—12 %, depending on the particle energy than the amplitude measured along the **b** axis, and even less on 15—20 % along the **c** axis. We conclude that 1) the best technical light yield of a small scintillation detector fabricated on the base of *p*-terphenyl single crystal of regular shape is reached when light flashes are registered along the axis **b** of its crystallographic lattice; 2) the *p*-terphenyl single crystal should be oriented with respect to active area of the photodetector taking into account the presented results of experimental studies while the manufacture of anti-coincident scintillation detector for high-energy charged particle monitor BPM of the solar X-ray spectrophotometer ChemiX of the interplanetary space mission “Interhelioprobe”.

Keywords: Interhelioprobe mission, X-ray spectrophotometer ChemiX, charged particle monitor, scintillation detector, *p*-terphenyl single crystal, β -particles, energetic spectrum, technical light yield.

А. В. Грицай¹, Г. П. Міліневський^{1, 2, 3}

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

³ Міжнародний центр науки майбутнього, Цзилінський університет, Чанчунь, Китай

ЗАГАЛЬНИЙ ВМІСТ ОЗОНУ НАД СТАНЦІЄЮ КИЇВ-ГОЛОСІЇВ ЗА НАЗЕМНИМИ ТА СУПУТНИКОВИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ У 2010—2015 рр.

Наземні вимірювання загального вмісту озону (ЗВО) в одиницях Добсона (ОД) проводяться за допомогою спектрофотометра Добсона на станції Київ-Голосіїв з травня 2010 р. Наземні вимірювання здійснюються за умов «прямого Сонця» (Direct Sun — DS), ясного неба в зеніті (Zenith Blue — ZB) чи хмарного неба в зеніті (Zenith Cloud — ZC) у стандартних парах довжин хвиль A, C, D у ближньому ультрафіолетовому діапазоні ($\lambda = 300...340$ нм). У цій роботі досліджуються розбіжності між супутниковими і наземними спостереженнями ЗВО в атмосфері над вказаною станцією. Крім того, розглядаються сезонні варіації ЗВО та зміни різниць між супутниковими та наземними вимірюваннями. Першим завданням роботи є дослідження головних особливостей сезонних варіацій ЗВО на станції Київ-Голосіїв. Друге завдання полягає в оцінці рівня відмінностей між супутниковими й наземними значеннями ЗВО та визначенні можливих причин цих відмінностей. Ми обробили вимірювання загального вмісту озону з допомогою спектрофотометра Добсона в двох парах довжин хвиль (AD і CD) для типів DS, ZB та ZC. Були залучені також супутникові дані приладів OMI/Aura, GOME-2/MetOpA та GOME-2/MetOpB. Для порівняння використано окремі вимірювання неподалік наземної станції та побудовані на їхній основі моделі з шестигодичним кроком. Різниця між супутниковими (моделними) та наземними даними досліджено окремо для кожного типу вимірювань спектрофотометра Добсона. Визначено, що мінімальні річні середні значення ЗВО фіксувались у 2011 р. (319...322 ОД залежно від типу вимірювань), а максимальні — у 2013 р. (327...338 ОД). Різниця між супутниковими й наземними даними демонструє сезонний цикл із відносною недооцінкою ЗВО при наземних спостереженнях у кінці осені — на початку зими. Головною причиною бачиться деяке заниження DSAD-значень поблизу моменту зимового сонцестояння. Вказане явище у першу чергу погіршує якість AD-даних через швидкий спад інтенсивності випромінювання у короткохвильовій парі A при збільшенні зенітної відстані Сонця (збільшується вплив розсіяного світла). Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Розбіжності збільшуються при високому вмісті озону понад 400 ОД. Навпаки, CD значення у таких умовах виявляються завищеними порівняно з модельними. Згідно з результатами зіставлення з супутниковими вимірюваннями, для спектрофотометра Добсона № 040 станції Київ-Голосіїв високу якість демонструють ряди спостережень типів DSAD, DSCD і ZBAD (за винятком DSCD для 2015 р.). Спостереження ZBCD і ZC виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а подвоєні середні квадратичні відхилення, обчислені протягом календарного року, регулярно перевищують 25 ОД.

Ключові слова: загальний вміст озону, спектрофотометр Добсона, супутникові вимірювання, спостережені ряди, порівняння даних.

ВСТУП

Загальний вміст озону в атмосфері визначається за допомогою дистанційних спостережень, головним чином у ближньому ультрафіолетовому діапазоні, де озон демонструє інтенсивне поглинання зі значною залежністю від довжини хвилі [1]. Загальний вміст озону (ЗВО) є інтегральною характеристикою, яка характеризує кількість молекул у верти-

кальному стовпі атмосфери одиничного перерізу. Величина ЗВО змінюється у просторі й часі. Визначення загального вмісту озону провадиться за допомогою наземних [13] і супутникових засобів [14]. Значна увага приділяється питанню взаємної узгодженості цих даних і оцінки відповідності між рядами різного походження [8, 14, 15].

Сезонні варіації ЗВО над Україною характерні для середніх широт північної півкулі загалом [7]. Максимум ЗВО з типовими значеннями близько

400 ОД спостерігається у лютому — квітні. Для цього ж періоду властиві суттєві перепади вмісту озону протягом кількох діб, а також помітні відмінності для різних років [2]. Натомість у жовтні — листопаді спостерігається сезонний мінімум зі значеннями близько 250 ОД. Для літа і осені типовими є незначні перепади вмісту озону від одного дня до іншого, а також слабка відмінність величин для різних років [3].

Вимірювання *ЗВО* на станції Київ-Голосіїв (координати 50.36 °N, 30.50 °E) з допомогою спектрофотометра Добсона № 040 ведуться з травня 2010 р. [11]. Ці вимірювання виконуються практично для кожного дня, за винятком ситуацій із тривалими інтенсивними опадами. Методика спостережень із спектрофотометром Добсона передбачає використання стандартних пар довжин хвиль AD і CD, що містяться у ближньому ультрафіолетовому діапазоні 300...340 нм; дві пари довжин хвиль дозволяють суттєво зменшити вплив аерозольного компонента атмосфери і релєвського розсіювання [5, 9]. Відмінності між обчисленнями за однією та за двома парами довжин хвиль ілюструються рис. 1.

Базовими є спостереження з використанням прямого сонячного випромінювання (Direct Sun, DS), для обчислення *ЗВО* за якими є фізично прозорий алгоритм, що ґрунтується на законі Бугера — Бера — Ламберта [5, 9]. Розрахунок у монохроматичному наближенні виконується за формулою [9]

$$X = \frac{\lg \frac{I_0}{I'_0} - \lg \frac{I}{I'} - (\beta - \beta')m \frac{p}{p_0} - (\delta - \delta') \sec Z}{\mu(\alpha - \alpha')}$$

Тут I_0 — інтенсивність сонячного випромінювання поза атмосферою Землі, I — інтенсивність випромінювання на поверхні Землі (у точці спостереження), μ — відношення реального та вертикального шляхів при проходженні випромінювання через озоновий шар, m — те ж відношення для атмосфери загалом, Z — (кутова) зенітна відстань Сонця (строго кажучи, замість $\sec Z$ має бути m_a — відношення реального та вертикального шляхів випромінювання через «аерозольний шар», але проведена заміна не вносить відчутних похибок), p — реальний тиск у

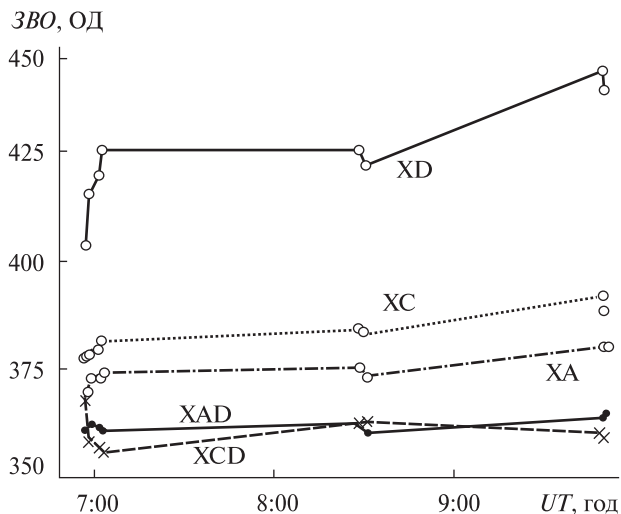


Рис. 1. Значення загального вмісту озону, отримані 16 травня 2016 р. з вимірювань із використанням прямого сонячного випромінювання як в одній (XA, XC, XD), так і у двох (XAD, XCD) парах довжин хвиль. Довжини хвиль становлять: 305.5 і 325.0 нм (пара A); 311.5 і 332.4 нм (C); 317.5 і 339.9 нм (D) — див. [9]

точці спостереження, $p_0 = 1013.25$ гПа — стандартний тиск на рівні моря, α — коефіцієнт поглинання озonom, β — оптична товщина при релєвському розсіянні за умови вертикального поширення випромінювання при стандартному атмосферному тиску на рівні моря $p_0 = 1013.25$ гПа, δ — аерозольна оптична товщина при вертикальному поширенні світла. Вказані параметри α , β , δ відповідають запису закону Бугера — Бера — Ламберта з основою 10.

Основними джерелами похибок при застосуванні описаного методу є вплив розсіяного у приладі світла [5], недостатня точність коефіцієнтів поглинання озonom [12], залишковий вплив аерозольної складової (зокрема, це стосується значних відхилень при обчисленнях за однією парою довжин хвиль — див. рис. 1). Також аналізується світло, розсіяне у зенітній області; такий алгоритм має статистичну основу — будується поліноміальна апроксимація з використанням одночасних DS-вимірювань [6, 9]. Залежно від стану неба в зеніті йдеться про вимірювання Zenith Blue (ZB) чи Zenith Cloud (ZC). Зенітні дані необхідні для знаходження *ЗВО* при відсутності чи недостатній якості спостережень за «прямим Сонцем».

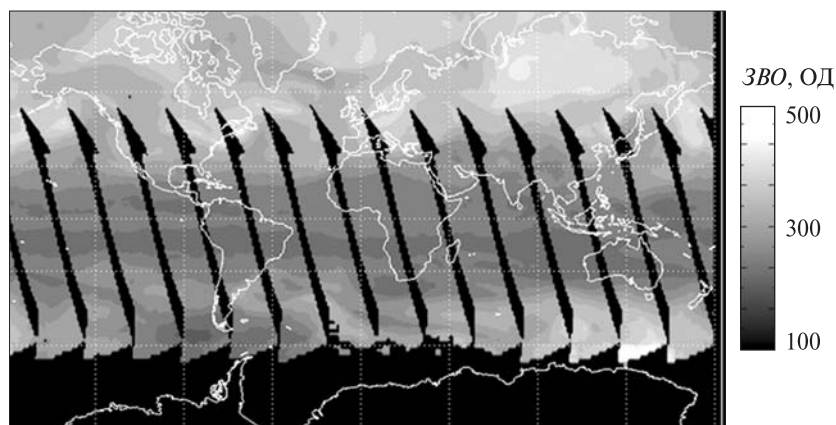


Рис. 2. Загальний вміст озону за даними ОМІ для 16 травня 2016 р

Зазвичай більш надійними є AD-вимірювання, які розглядаються як базові [9]. Втім, ситуація змінюється при малих висотах Сонця [5], що необхідно враховувати протягом одного-півтора місяців до і після зимового сонцестояння. Інтенсивність короткохвильового випромінювання у парі A значно зменшується, це збільшує відносний вплив розсіяного світла на результат. Як наслідок, за таких умов меншими похибками характеризуються вже CD-дані, у свою чергу AD-спостереження помітно недооцінюють ZBO (див., зокрема, [2]). Особливо значними похибками стають якраз для спостережень за прямим сонячним випромінюванням.

ДАНІ І МЕТОДИКА

У даній роботі використовуються дані окремих вимірювань на станції Київ-Голосіїв, а також середньодобові значення. Розглядалися всі шість типів даних, які з'являються при DS-, ZB- та ZC-вимірюваннях у парах довжин хвиль AD і CD — подібно до роботи [2], де аналізувалися дані 2010—2012 рр.

Регулярні супутникові вимірювання загального вмісту озону проводяться з кінця 1978 р. [10]. Головний метод визначення ZBO ґрунтується на аналізі інтенсивності розсіяного у зворотному напрямку з області надиру випромінювання у ближньому ультрафіолетовому діапазоні (спектрофотометр Добсона має справу з таким же випромінюванням, що пройшло крізь земну атмосферу). У цій роботі використано дані су-

путникових інструментів Ozone Monitoring Instrument (OMI) / Aura, Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) / MetOpA та GOME-2/ MetOpB (із квітня 2013 р.); див. <http://www.temis.nl>. Усі такі супутники мають полярні сонячно-синхронні орбіти з нахилом близько 98° . Приклад карти, отриманої за вимірюваннями ОМІ/ Aura, наведено на рис. 2. Зазначимо, що для оцінки довгострокових варіацій також залучено базу даних Multi-Sensor Reanalysis (MSR) для 1979—2008 рр. (<http://www.temis.nl>), утворену на основі вимірювань різних приладів.

Що стосується супутникових даних, використані індивідуальні вимірювання (http://www.temis.nl/protocols/o3col/overpass_omi.html), а також моделі, побудовані на основі таких результатів (http://www.temis.nl/protocols/o3field/overpass_omi.html). Модель забезпечує сталий часовий крок (шість годин; значення представлено для 00, 06, 12 та 18^h UT). Такий формат спрощує обробку, тим більше що дані наявні практично для всіх моментів часу. Зрозуміло, точність подібних рядів може помітно змінюватися на різних часових інтервалах. Для порівняння з наземними вимірюваннями використано дані моделі ОМІ станом на 12^h UT, оскільки цей час найбільш відповідає часу спостережень зі спектрофотометром Добсона.

Індивідуальні супутникові вимірювання представлено у формі так званих «оверпасів», коли наводиться результат, для якого центр поля зору приладу перебував якнайближче до наземної

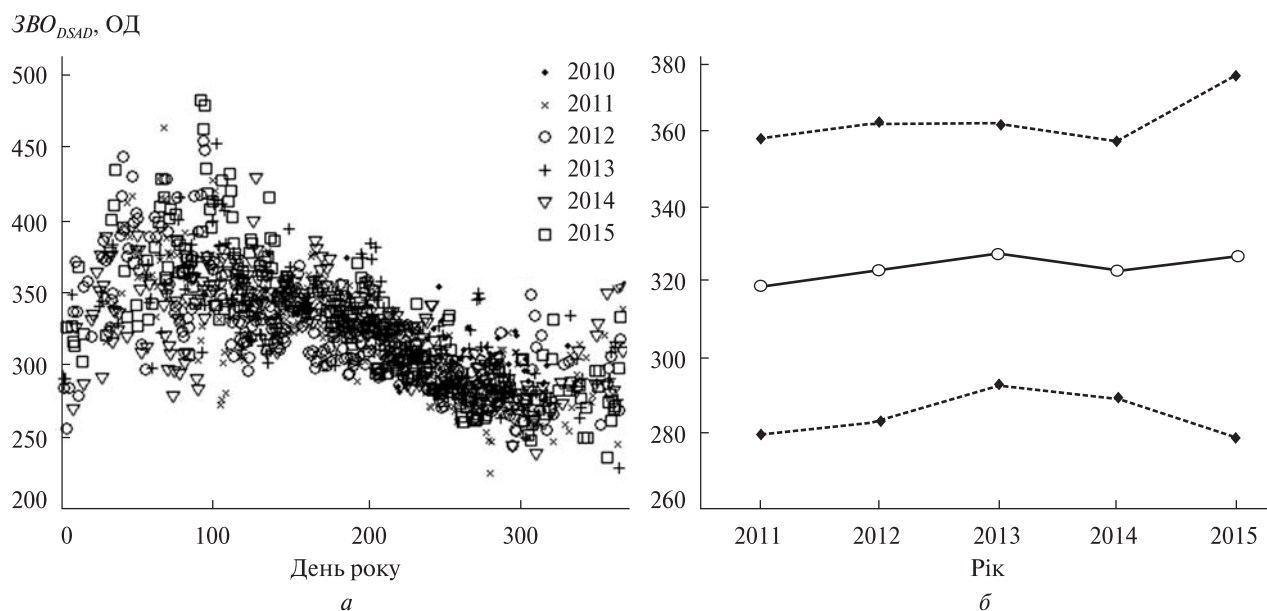


Рис. 3. Значення ZBO_{DSAD} за даними наземних вимірювань типу DSAD на станції Київ-Голосіїв: а — середньодобові дані, б — середньорічні дані

станції. При зіставленні таких даних із наземними важливий просторовий і часовий збіг [14]. Втім, у типових атмосферних умовах масштаб варіацій ZBO дозволяє не враховувати погіршення збіжності при різниці моментів вимірювань у кілька годин і відстаней — у межах 50...100 км.

СЕЗОННІ І МІЖРІЧНІ ЗМІНИ

Результати на рис. 3 підтверджують отримані за супутниковими вимірюваннями висновки [7], що сезонний максимум на станції Київ-Голосіїв спостерігається навесні, а сезонний мінімум — у середині осені. Для періоду перед максимумом і під час нього типовими є великі перепади ZBO , іноді — квазірегулярні. Натомість літньо-осінній період характеризується незначними міждобовими та міжрічними варіаціями. Оскільки рис. 3 містить DSAD-дані, то кількість точок для різних сезонів року неоднакова у зв'язку з мінливістю погодних умов. Відзначимо, що річні середні при переході до інших типів вимірювань змінюються слабо. Мінімальні річні середні значення фіксувались у 2011 р. (319...322 ОД залежно від типу вимірювань), а максимальні — у 2013 р. (327...338 ОД). Високі рівні озону над Європою реєструвались у 2010 р. [4], але неповні

дані станції Київ-Голосіїв для цього року не дозволяють обчислити надійне середнє. Водночас згідно з моделлю ОМІ 2010-й рік дійсно характеризується високими значеннями вмісту озону (рис. 4).

Моделі на основі даних ОМІ, GOME2-а і GOME2-б були використані для обчислення річних середніх і середніх квадратичних відхилень, які характеризують розкид даних протягом року. Отримані результати наведено на рис. 4, при цьому дані спектрофотометра Добсона охоплюють період 2011–2015 рр., а GOME2-б — тільки 2014 і 2015 рр. Для уявлення про довгострокові варіації ZBO на рис. 4 також показані дані MSR, які охоплюють 1979–2008 рр. Вони демонструють властиве середньоширотним станціям помірне зменшення вмісту озону протягом 1980-х рр. із мінімумом на початку 1990-х і збільшенням протягом наступного десятиліття (див., наприклад, ряд [13], отриманий на станції Ароза у Швейцарії). Порівняння рядів даних демонструє, що іноді виникає навіть збіг середньорічних характеристик у межах 1 ОД (ZBO для 2012 р., середні квадратичні відхилення для 2014 р.) — це вказує на непогану узгодженість результатів різних приладів. З високою точністю збігаються середні по-

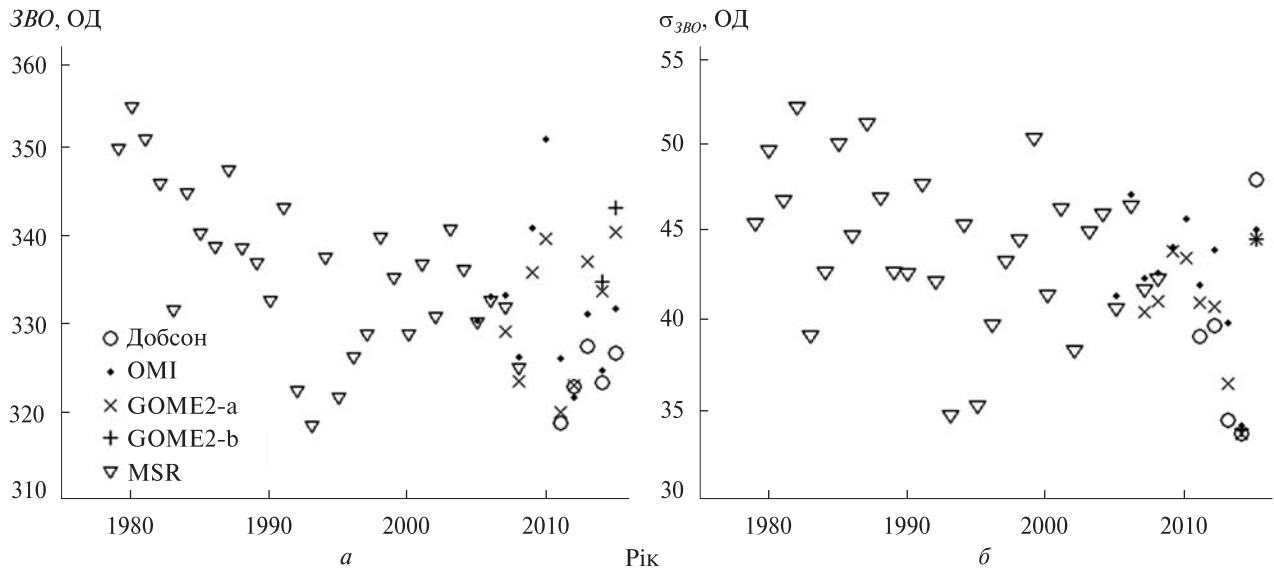


Рис. 4. Середньорічні значення ZVO (а) та відповідні середні квадратичні відхилення σ_{ZVO} (б) у 1979–2015 рр. Використано добові DSAD-дані спектрофотометра Добсона та модельні значення станом на $UT = 12^h$ кожного дня (OMI, GOME2-a, GOME2-b та MSR)

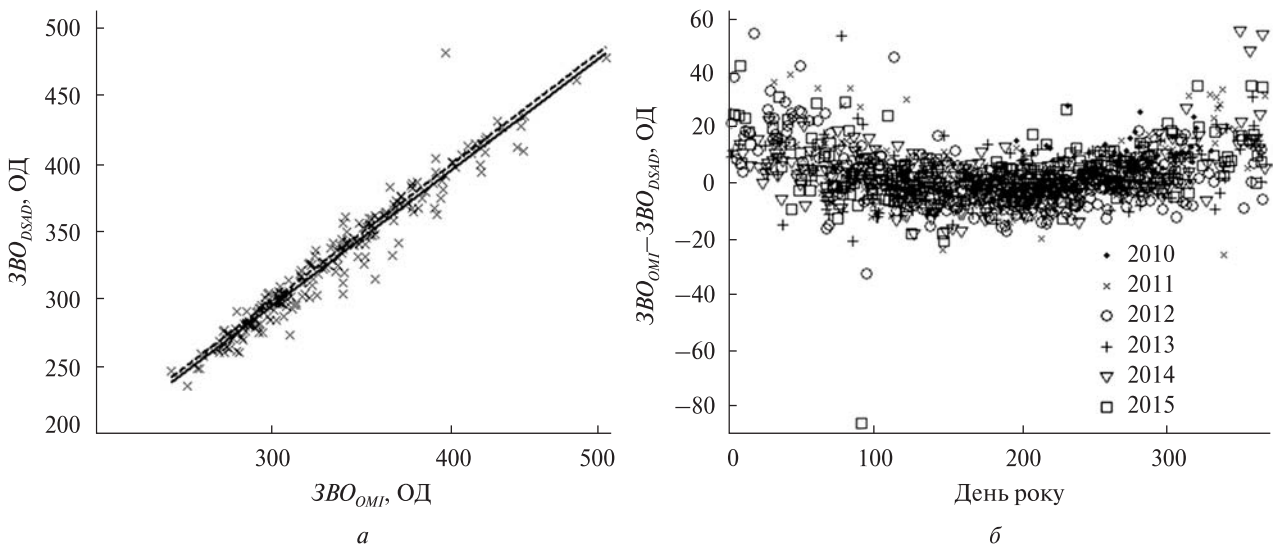


Рис. 5. Корелятивна залежність значень ZVO_{DSAD} , отриманих за даними спектрофотометра Добсона у 2015 р., від модельних значень ZVO_{OMI} станом на 12^h UT (суцільна пряма — апроксимація $ZVO_{DSAD} = (1.00 \pm 0.03)ZVO_{OMI} - 2.9 \pm 10.3$, штрихова — лінія однакових значень $ZVO_{DSAD} = ZVO_{OMI}$) (а) та річні варіації різниці $ZVO_{OMI} - ZVO_{DSAD}$ для 2010–2015 рр. (б)

казники для моделей на основі GOME2-а та GOME2-б. В інших випадках розбіжності більш серйозні. Скажімо, зіставлення річних середніх для 2010 і 2013–2015 рр. може призвести до різних висновків при використанні моделей OMI та GOME2-а. Дані про масштаб варіацій ZVO (рис. 4, б) мають вищу однорідність і свідчать, зокрема, про менші перепади вмісту озону у 2014 р.

(середнє квадратичне відхилення $\sigma_{ZVO} \approx 35$ ОД) порівняно з 2015 р. (45 ОД чи дещо більше).

ЗІСТАВЛЕННЯ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ НАЗЕМНИМИ І СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ

На рис. 5, а приведено корелятивну залежність значень ZVO_{DSAD} над станцією Київ-Голосіїв,

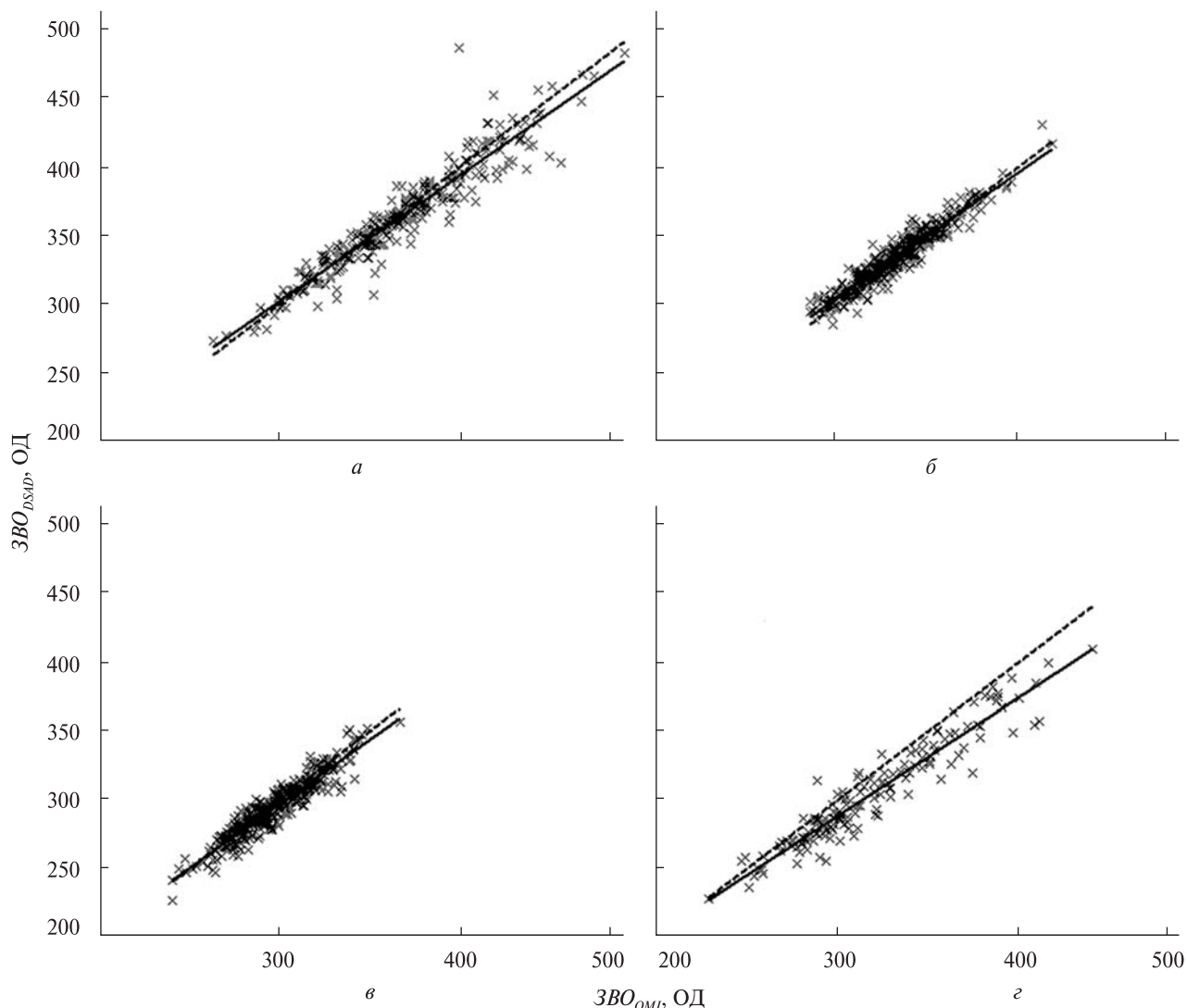


Рис. 6. Корелятивні залежності значень ZBO_{DSAD} , отриманих з DSAD-вимірювань зі спектрофотометром Добсона, від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT для різних сезонів та їхні лінійні апроксимації (суцільні прямі): а — весна (дні року 35...125, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.91 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 27.6 \pm 12.4$), б — літо (126...219, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.92 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 29.3 \pm 9.2$), в — осінь (220...311, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.94 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 15.8 \pm 9.9$), г — зима (312...34, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.86 \pm 0.04)ZBO_{OMI} + 29.1 \pm 14.2$). Штрихові прямі — лінії однакових значень

отриманих за DSAD-даними спектрофотометра Добсона, та модельних значень ZBO_{OMI} , отриманих на основі вимірювань ОМІ. У середньому наземні та модельні дані між собою узгоджуються добре, але є набір точок, для яких спектрофотометр Добсона показав відносно заниження на кілька десятків одиниць Добсона. Зокрема, у шістнадцяти випадках наземні добові середні нижчі за модельні більш як на 20 ОД, аналогічне перевищення даних DSAD порівняно з моделлю

ОМІ спостерігається тільки для двох діб у 2015 р. Це підтверджується і даними наземних вимірювань для всіх років (рис. 5, б): максимальні відхилення вказаного характеру спостерігаються поблизу моменту зимового сонцестояння. Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Середнє значення різниці за весь період, природно, суттєво менше: у 2015 р. становило 4.1 ± 22.3 ОД (вказане подвійне середнє квадратичне відхилення 2σ). Розкид різниць наймен-

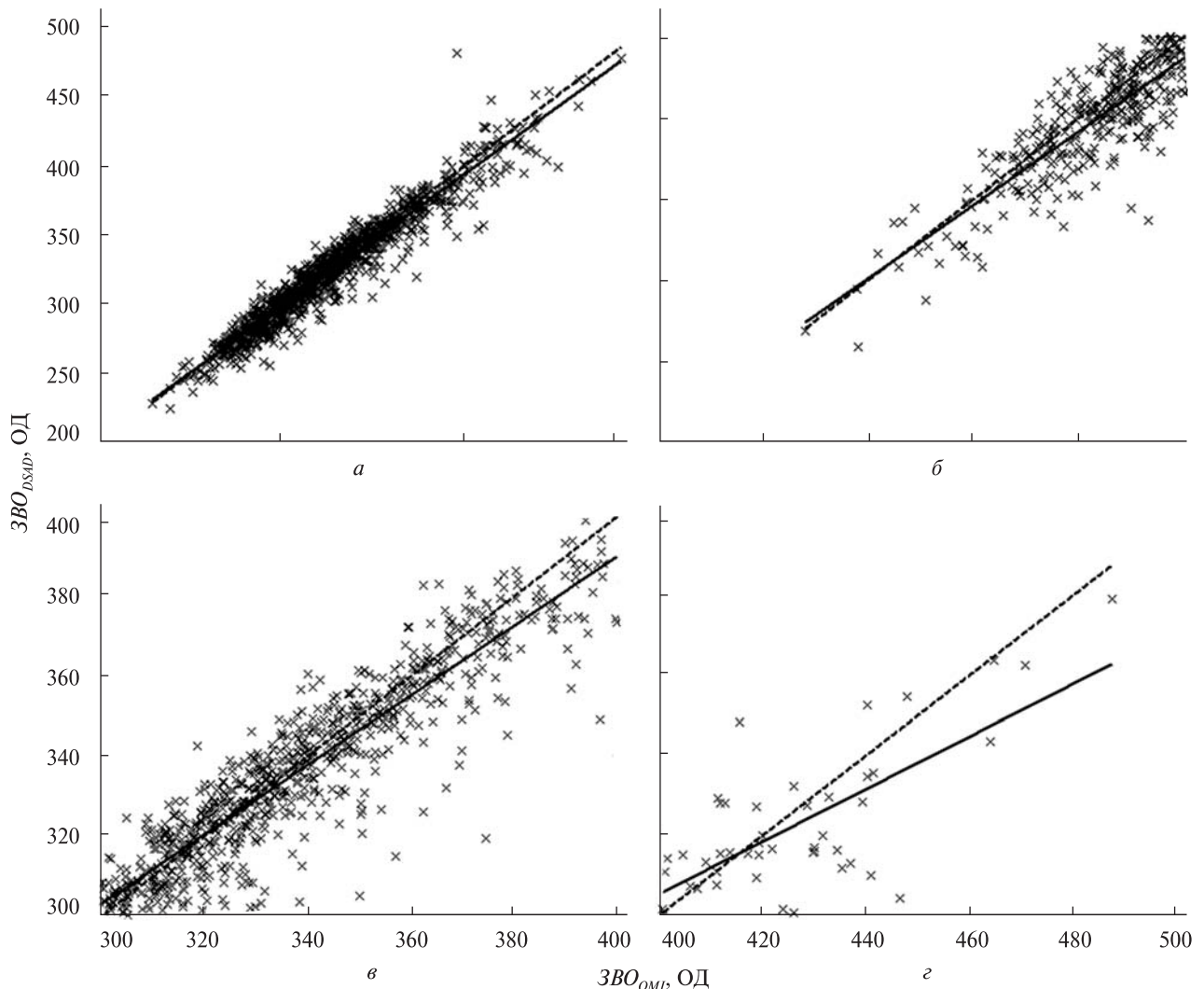


Рис. 7. Корелятивні залежності середньодобових значень ZBO_{DSAD} , отриманих з DSAD-вимірювань зі спектрофотометром Добсона, від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT для різних динамічних діапазонів та їхні лінійні апроксимації (суцільні прямі): *a* — 200...500 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.95 \pm 0.01)ZBO_{OMI} + 12.0 \pm 4.7$, *б* — 200...300 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.91 \pm 0.06)ZBO_{OMI} + 22.8 \pm 18.0$, *в* — 300...400 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.87 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 41.5 \pm 9.1$, *г* — 400...500 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.66 \pm 0.20)ZBO_{OMI} + 142.6 \pm 85.6$. Штрихові прямі — лінії однакових значень

ший у літній період, коли самі значення ZBO також демонструють найменшу мінливість.

Виявлені відмінності спонукають до безпосереднього аналізу корелятивної залежності супутникових та наземних даних для різних сезонів. Такий аналіз проведено для періодів навколо весняного та осіннього рівнодень (рис. 6, *a* і *в* відповідно) та літнього і зимового сонцестоянь (рис. 6, *б* і *г* відповідно) із застосуванням усіх вимірювань за 2010—2015 рр. Як і слід було очікувати, літні та осінні дані демонструють незна-

чний діапазон варіацій ZBO у межах 100 ОД. Самі відхилення теж незначні, зі збільшенням ZBO проявляється деяке відносно заниження даних спектрофотометра Добсона, на що вказує коефіцієнт, менший за одиницю, для відтвореної лінійної регресії. Описане явище стає куди більш суттєвим для весняних вимірювань із високим рівнем озону (рис. 6, *a*), а надто — для зимових із мінімальною висотою Сонця (рис. 6, *г*). В останньому випадку кутовий коефіцієнт прямої, яка відображає лінійну регресію, становить лише

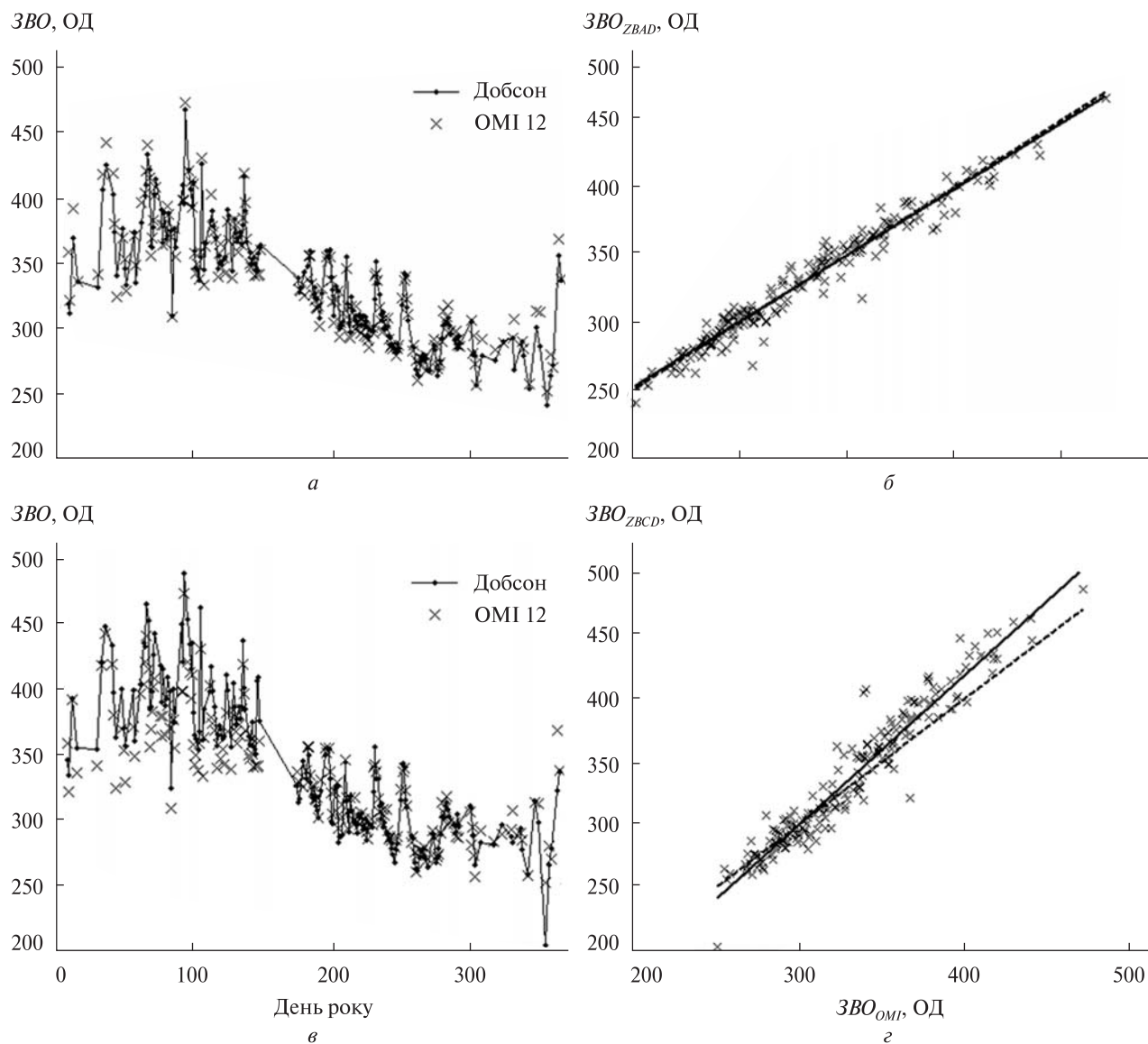


Рис. 8. Річні варіації значень ZBO_{ZBAD} (а) та ZBO_{ZBCD} (в) у 2015 р. за даними спектрофотометра Добсона (ZBAD та ZBCD відповідно), а також корелятивні залежності цих величин від модельних значень: б — залежність ZBO_{ZBAD} від ZBO_{OMI} станом на 12^h UT (апроксимація $ZBO_{ZBAD} = (0.98 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 8.0 \pm 9.5$), г — залежність ZBO_{ZBCD} від ZBO_{OMI} (апроксимація $ZBO_{ZBCD} = (1.19 \pm 0.05)ZBO_{OMI} - 55.4 \pm 15.3$). Штрихові прямі — лінії однакових значень

0.86, і для переважної більшості точок наземні значення, отримані при DSAD-вимірюваннях, нижчі за знайдені з моделі OMI станом на 12^h UT. Отже, як бачимо, погіршення якості DSAD-вимірювань відбувається при малій висоті Сонця над горизонтом, а супутнім фактором постає збільшення вмісту озону.

На рис. 7 наведено лінійні залежності ZBO_{DSAD} від ZBO_{OMI} та їхні апроксимації, побудовані методом найменших квадратів для різних динаміч-

них діапазонів (a — 200...500, $б$ — 200...300, $в$ — 300...400, $г$ — 400...500 ОД). Для забезпечення симетричності картини з розгляду вилучалися спостереження, які потрапляли до шуканого інтервалу тільки за одним типом вимірювань. Помітно, що наземні вимірювання зі спектрофотометром Добсона дають відносно заниження при підвищенні вмісту озону. Кутовий коефіцієнт у лінійній залежності для всіх випадків менший за одиницю, причому він зменшується при

переході до інтервалів із вищим ЗВО. Зауважимо, що кількість днів із вмістом озону, що перевищує 400 ОД, відносно незначна, тому результати для цього інтервалу менш надійні (рис. 7, з).

Сезонні зміни ЗВО за даними ZBAD та ОМІ для 2015 р., а також їхні корелятивні залежності показано на рис. 8, а і б відповідно. Пауза в середині року викликана калібруванням спектрофотометра Добсона у Гогенпайсенберзі, через що виникла прогалина у вимірюваннях з 29 травня по 15 червня. Структура сезонного циклу залежно від типу даних суттєво не змінюється, але значення для спектрофотометра Добсона поблизу моменту зимового сонцестояння дещо занижені. Середня різниця даних у 2015 р. становить $0.0 \pm \pm 17.6$ ОД, але є помітний сезонний хід різниці. Видно, що якість ZBAD-даних не поступається якості базових спостережень за прямим Сонцем (DSAD). Відхилення апроксимаційної прямої від лінії однакових значень лежать у межах похибок. Для ZBCD-вимірювань різниця «модель — Добсон» у 2015 р. складала -6.3 ± 32.4 ОД. До того ж різниці є дуже неоднорідними протягом року: завищені на 20...30 ОД наземні значення до калібрування змінюються однаковими чи трохи завищеними значеннями після калібрування, а надто наприкінці року, коли спостерігаються суттєві перепади на коротких часових інтервалах. Так, рис. 8, з демонструє, що при високому вмісті озону ZBCD-значення перевищують модельні, лінійна апроксимація дає кутовий коефіцієнт 1.19. Таким чином, ZBCD-дані виявляються не досить надійними, на відміну від ZBAD.

Рис. 9 показує масштаб розбіжностей між моделлю, створеною на основі вимірювань ОМІ, та вимірюваннями зі спектрофотометром Добсона. Тут приведено різниці між модельними та наземними даними всіх типів для станції Київ-Голосіїв. Як видно, у 2010 р. (рис. 9, а) є відносна недооцінка значень із боку спектрофотометра Добсона, особливо в кінці року — навіть при тому, що тоді не виконувались AD-вимірювання. До порівняння середніх показників для 2010 р. із даними для інших років слід ставитись обережно. Вимірювання розпочалися 13 травня 2010 р., а регулярно здійснюються тільки з вересня 2010 р., тому ряд має недостатню довжину і несиметрич-

но відображає внесок для різних пір року. Можна зауважити деякий сезонний хід різниць у 2011 р. (рис. 9, б); високі значення різниць, які відповідають відносному заниженню для спектрофотометра Добсона, спостерігалися на початку року. Рис. 9, в демонструє проблеми із ZBCD-значеннями влітку 2012 р. — є систематичне відносне їхнє завищення порівняно з моделлю. При хмарному небі помітні значні відхилення. У 2013 р. (рис. 9, з) є інтервали із завищеними ZBCD-даними, цього разу навесні і восени. Трапляються надмірні перепади за прямим Сонцем та великі розбіжності за хмарним небом. У 2014 р. (рис. 9, д) систематичне завищення спостерігається для всіх CD-даних. Великих відхилень небагато, але в кінці року є виразне відносне заниження з боку спектрофотометра Добсона. Передовсім це характерно для DSAD- та ZCAD-даних. Для 2015 р. (рис. 9, д) зауважуємо зменшення розбіжностей після червневого калібрування.

У табл. 1 вказано середньорічні значення різниць для всіх проаналізованих років вимірювань. Можна зауважити основні особливості, помітні з табл. 1. Так, середні квадратичні відхилення у 2012 р. для всіх типів вимірювань є максимальними чи принаймні одними з найбільших. Ця обставина з високою ймовірністю свідчить про неоднорідність даних спектрофотометра Добсона у цей рік. Раніш уже зазначалося, що влітку 2012 р. спостерігаються значні розбіжності для ZBCD-даних. Меншою мірою це характерно і для обох типів ЗС-вимірювань. У підсумку до 2015 р. три з чотирьох значень подвоєного середнього квадратичного відхилення σ , що перевищують 30 ОД, зафіксовані саме у 2012 р. Є чітка тенденція до зменшення різниць «модель — Добсон» із часом, особливо у випадку CD-спостережень. Оскільки ця тенденція є суттєво неоднаковою для різних типів вимірювань, то основну її причину слід шукати саме в даних спектрофотометра Добсона. Привертає увагу систематичний спад різниці для ZBCD-даних із рекордним від'ємним значенням, що означає відносне завищення для наземних спостережень у 2014 р. Показово, що такі розбіжності стають максимальними за модулем у літній період, коли умови вимірювань звичайно найліпші. Причина

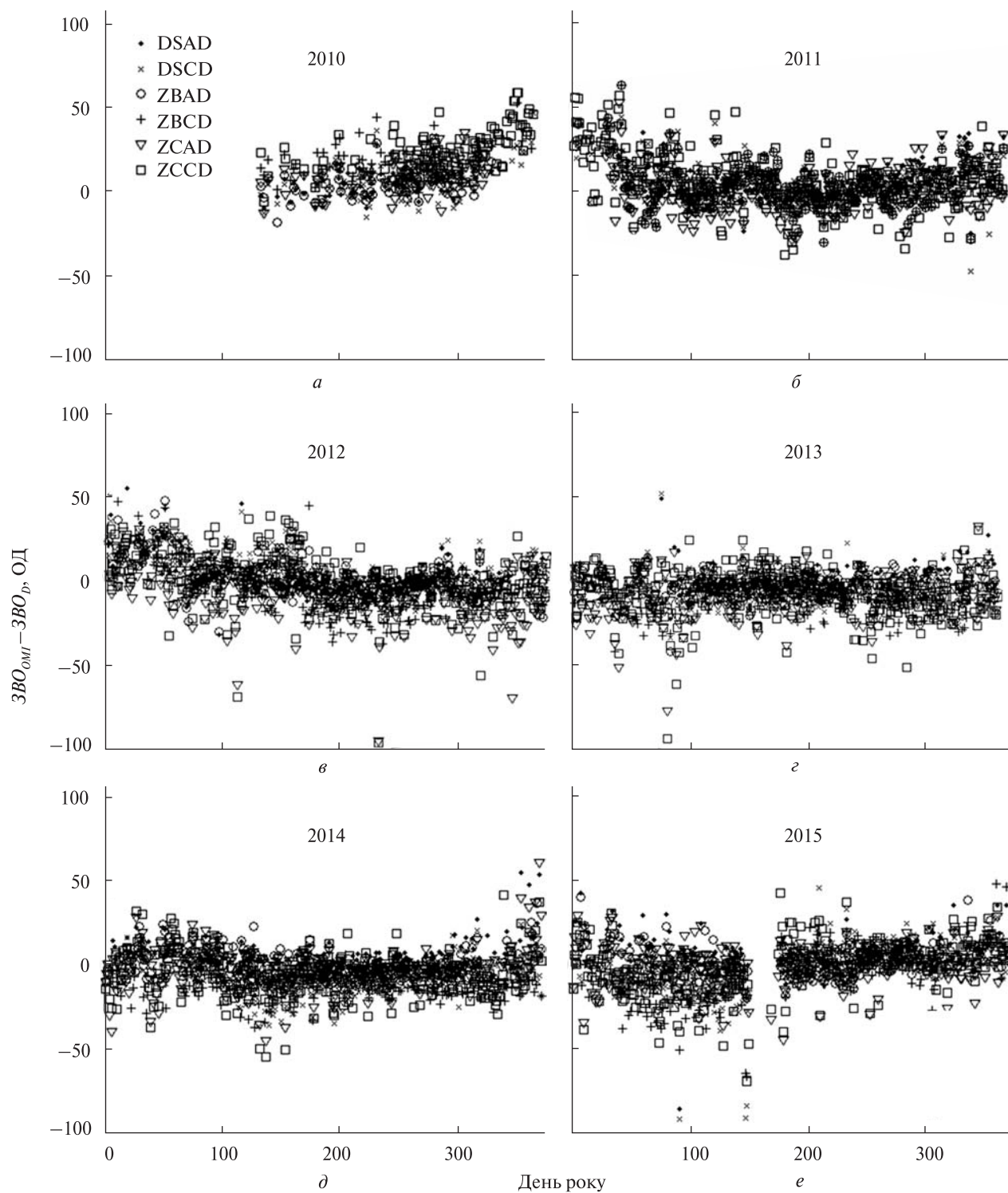


Рис. 9. Річні варіації різниць $ZBO_{OMI} - ZBO_D$ модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT та добових середніх значень ZBO_D , отриманих зі спектрофотометром Добсона у 2010–2015 рр. за всіма типами наземних даних (DSAD, DSCD, ZBAD, ZBCD, ZCAD та ZCCD)

може полягати в характері відтворення залежності ZBCD (і у меншій мірі інших CD-спостережень) від зенітної відстані Сонця. Між тим, розкид значень після 2012 р. виглядає більш прийнятним. Варто відзначити, що за середнім квадратичним відхиленням найліпший результат для 2011—2013 рр. дають ZBAD-дані, для 2014 р. — ZBCD (!), хоч і з несуттєвою відмінністю від ZBAD. Тільки для неповного 2010 р. середнє квадратичне відхилення у випадку DSAD трохи менше, ніж для ZBAD. Вимірювання за ясним небом у зеніті виявляються надійнішими, ймовірно, через більшу однорідність умов: вимірювання за прямим Сонцем можуть вестися при змінній частковій хмарності. 2015 р. відзначається низькою якістю CD-даних, що проявляється великими, понад 30 ОД, подвоєними середніми квадратичними відхиленнями. Для AD-спостережень результати цілком задовільні, найліпша ситуація зберігається при вимірюваннях по ясному небу в зеніті. Отримано також результати зіставлення модельних даних, отриманих на основі вимірювань GOME2-а, та середньодобових значень для спектрофотометра Добсона. Табл. 2 містить результати зіставлення для даної моделі. Відмінність між табл. 1 і 2 змушує при-

писати частину систематичних змін моделям, а не наземним спостереженням. Добре помітно, що в 2010—2011 рр. модель на основі GOME2 давала систематично нижчі значення ZBO , а в 2013—2014 рр. — вищі. Запитання щодо надійності результатів ZBCD у 2011—2012 рр. залишається актуальним у будь-якому випадку.

Для порівняння якості даних різних типів, отриманих зі спектрофотометром Добсона, на рис. 10, а приведено середньорічні значення розбіжностей модельних значень ZBO_{OMI} (на 12^h UT) і середньодобових значень ZBO_D різних типів для спектрофотометра Добсона, а на рис. 10, б — подвоєні середні квадратичні відхилення 2σ для вказаних різниць.

При його аналізі потрібно пам'ятати про недостатню репрезентативність вимірювань для 2010 р., адже вони були розпочаті тільки 13 травня, а у близькому до неперервного режимі здійснювались лише із 1 вересня. Тому при наявності сезонного циклу різниць (рис. 10, а) навряд чи варто говорити про якусь особливу неточність вимірювань у 2010 р. на основі середньорічних величин. Як наслідок, наведені точки для 2010 р. є тільки орієнтовними. Аналіз іншої частини залежності загалом підтверджує вищу якість AD-

Таблиця 1. Середньорічні різниці $ZBO_{OMI} - ZBO_D$. Для кожного дня використовувались модель OMI станом на 12^h UT та середньодобові значення для відповідного типу вимірювань спектрофотометра Добсона

Ряд даних	$ZBO_{OMI} - ZBO_D \pm 2\sigma$, ОД					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DSAD	5.4 ± 15.3	3.7 ± 21.7	1.8 ± 23.0	1.6 ± 17.3	2.5 ± 19.0	4.1 ± 22.3
DSCD	7.5 ± 23.5	2.9 ± 22.6	3.9 ± 24.2	-2.1 ± 19.0	-7.1 ± 22.1	-2.6 ± 39.3
ZBAD	4.6 ± 15.7	3.4 ± 21.4	1.2 ± 21.8	-0.9 ± 14.9	-0.8 ± 17.6	0.0 ± 17.6
ZBCD	17.1 ± 18.6	2.2 ± 25.3	-4.8 ± 30.7	-7.5 ± 19.9	-10.8 ± 17.2	-6.3 ± 32.4
ZCAD	8.5 ± 19.3	1.8 ± 25.2	-7.0 ± 30.2	-5.8 ± 23.7	-3.0 ± 24.1	-0.9 ± 24.5
ZCCD	24.7 ± 24.8	6.1 ± 33.1	-0.1 ± 33.2	-5.1 ± 29.1	-5.8 ± 27.0	-2.2 ± 32.8

Таблиця 2. Різниці $ZBO_{GOME2-a} - ZBO_D$ між модельними і наземними даними (модель GOME2-а)

Ряд даних	$ZBO_{GOME2-a} - ZBO_D \pm 2\sigma$, ОД				
	2010	2011	2012	2013	2014
DSAD	-4.3 ± 15.7	-3.4 ± 19.4	2.4 ± 18.8	6.1 ± 20.4	9.8 ± 21.9
DSCD	-1.6 ± 25.7	-4.1 ± 20.5	4.8 ± 22.1	2.5 ± 20.2	0.1 ± 24.4
ZBAD	-5.2 ± 16.0	-3.6 ± 18.7	1.8 ± 17.2	3.8 ± 17.6	6.4 ± 19.7
ZBCD	7.6 ± 19.5	-4.9 ± 23.9	-4.4 ± 26.5	-2.8 ± 18.1	-3.7 ± 17.9
ZCAD	-0.5 ± 20.2	-5.1 ± 22.8	-5.4 ± 25.6	-0.2 ± 26.2	5.8 ± 25.2
ZCCD	17.2 ± 27.0	-0.6 ± 32.3	2.3 ± 30.6	0.6 ± 30.0	3.1 ± 28.6

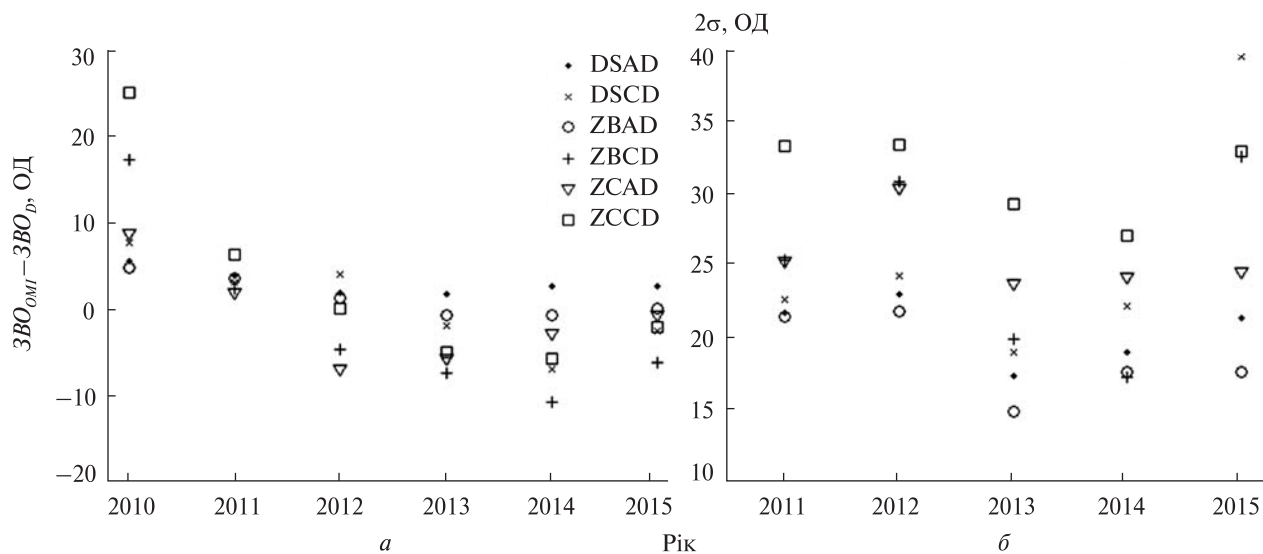


Рис. 10. Середньорічні значення різниць $ZBO_{OMI} - ZBO_D$ модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT та середньодобових значень ZBO_D за рядами даних різних типів для спектрофотометра Добсона (а) та подвоєні середні квадратичні відхилення 2σ для вказаних рядів (б)

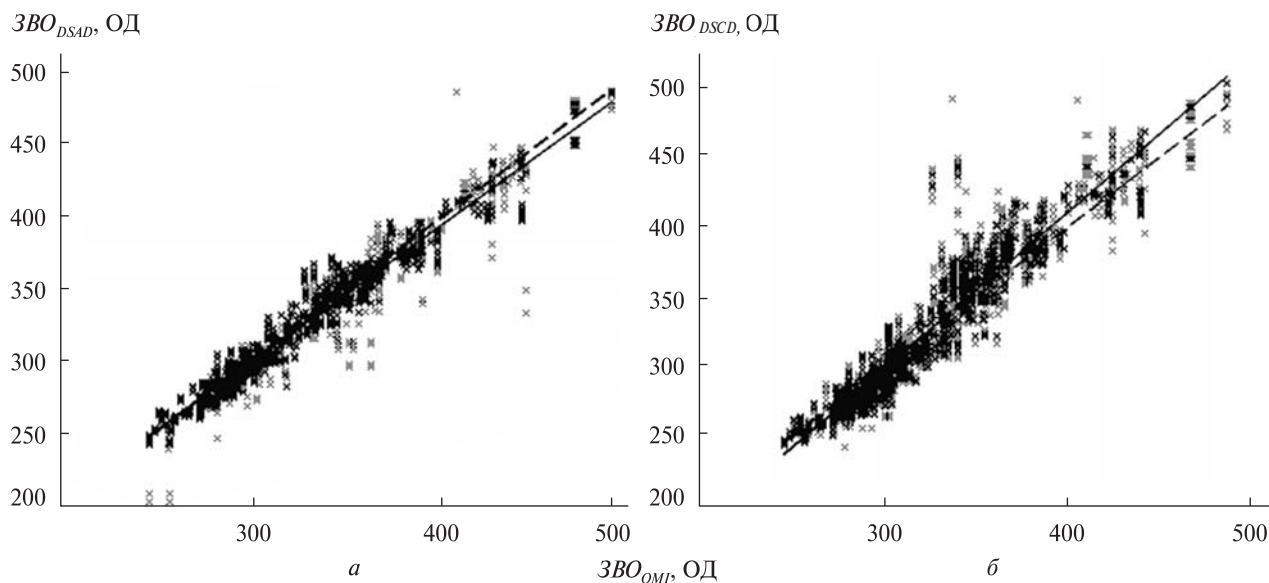


Рис. 11. Корелятивні залежності середньодобових значень ZBO_{DSAD} (а) та ZBO_{DSCD} (б), отриманих у 2015 р. за даними спектрофотометра Добсона (DSAD та DSCD відповідно), від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT. Суцільні прямі — апроксимації $ZBO_{DSAD} = (0.96 \pm 0.01)ZBO_{OMI} + 10.0 \pm 2.6$ та $ZBO_{DSCD} = (1.12 \pm 0.01)ZBO_{OMI} - 37.9 \pm 4.2$. Штрихові прямі — лінії однакових значень

даних відносно CD-даних, що добре помітно з поведінки значень 2σ (рис. 10, б), які відображають повторюваність результату. Потрібне подальше дослідження надійності ZBCD-даних з огляду на не досить зрозумілі міжрічні стрибки. Проведений аналіз показує, що високу якість забезпечують DSAD-, DSCD- і ZBAD-ряди (за ви-

нятком DSCD-ряду для 2015 р.). ZBCD- і ZCADані виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а їхні подвоєні середні квадратичні відхилення регулярно перевищують 25 ОД.

Досліджувалися також розбіжності між індивідуальними вимірюваннями спектрофотометра Добсона та ОМІ. Використовувались оверпаси,

отримані в радіусі 100 км від наземної станції протягом тієї ж доби. Для прикладу на рис. 11 показано результати зіставлення для DSAD- і DSCD-даних для 2015 р. Структура розбіжностей подібна до описаної для середньодобових наземних і модельних рядів: невелике відносне заниження *ZBO* у випадку AD-вимірювань при високому вмісті озону та, навпаки, завищення для CD-вимірювань (на зразок спостережень за ясним небом у зеніті з рис. 8, г). Зростає вплив окремих невдалих вимірювань (викиди), оскільки при обчисленні середньодобових значень вони згладжувалися. Різниця у проілюстрованій ситуації становить: 2.5 ± 21.3 ОД (ОМІ – DSAD) і -2.0 ± 36.3 ОД (ОМІ – DSCD).

ВИСНОВКИ

Проаналізовано наземні і супутникові дані загального вмісту озону над станцією Київ-Голосіїв протягом 2010–2015 рр. Сезонний максимум на станції Київ-Голосіїв спостерігається навесні (лютий – березень), а сезонний мінімум – у середині осені (жовтень – листопад), що відповідає звичайній картині для середніх широт північної півкулі. Для періоду перед максимумом і під час нього типовими є значні перепади *ZBO*, іноді – квазірегулярні. У свою чергу, міждобові та міжрічні варіації для літньо-осіннього періоду є незначними. Відзначимо, що річні середні для різних типів вимірювань зі спектрофотометром Добсона суттєво не відрізняються. Мінімальні річні середні значення фіксувались у 2011 р. (319...322 ОД залежно від типу вимірювань), а максимальні – у 2013 р. (327...338 ОД). Високі рівні озону реєструвались у 2010 р., але неповні дані станції Київ-Голосіїв для цього року не дозволяють обчислити надійне середнє. Водночас модель на основі вимірювань супутникового приладу ОМІ дійсно показує високі значення вмісту озону. Такий результат, щоправда, суперечить отриманому з моделлю GOME2-а, тому остаточні висновки про відхилення *ZBO* у 2010 р. від значень для сусідніх років зробити не вдається.

Згідно з результатами зіставлення з супутниковими вимірюваннями для спектрофотометра Добсона № 040 станції Київ-Голосіїв високу якість демонструють DSAD-, DSCD- і ZBAD-

ряди (за винятком DSCD для 2015 р.). ZBCD- і ZC-дані виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а подвоєні середні квадратичні відхилення, обчислені протягом календарного року, регулярно перевищують 25 ОД. Різниця між супутниковими і наземними даними демонструє сезонний цикл із максимумом (тобто, відносною недооцінкою *ZBO* при наземних спостереженнях) у кінці осені – на початку зими. Головною причиною бачиться деяке заниження DSAD-значень поблизу моменту зимового сонцестояння, коли зенітна відстань Сонця велика. Вказане явище у першу чергу погіршує якість AD-даних через швидкий спад інтенсивності випромінювання у короткохвильовій парі А при збільшенні зенітної відстані Сонця (зростає вплив розсіяного всередині спектрофотометра Добсона світла). Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Відносна недооцінка при AD-спостереженнях збільшується, якщо вміст озону високий. У випадку CD-спостережень, навпаки, значення спектрофотометра Добсона в умовах високого *ZBO* збільшуються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 288 с.
2. Грицай А. В., Міліневський Г. П. Аналіз розбіжності наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону: станція Київ-Голосіїв // Космічна наука і технологія. — 2014. — **20**, № 1. — С. 3–13.
3. Могильняк В. Ю., Міліневський Г. П. Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України // Космічна наука і технологія. — 2017. — **23**, № 2. — С. 41–47.
4. Antón M., Mateos D. Shortwave radiative forcing due to long-term changes of total ozone column over the Iberian Peninsula // Atmos. Environ. — 2013. — **81**. — P. 532–537.
5. Basher R. E. Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy. — Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 1982. — Rep. N 13. — 94 p.
6. Dobson G. M. B., Normand C. W. B. Determination of the constants etc. used in the calculation of the amount of ozone from spectrophotometer measurements and of the accuracy of the results // Ann. Int. Geophys. Year. — 1962. — **16**, Part II. — P. 161–191.
7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes // Rem. Sens. Lett. — 2014. — **5**, N 3. — P. 205–212.

8. Fioletov V. E., Labow G., Evans R., et al. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**, N D14. — D14313.
 9. Komhyr W. D., Evans R. D. Operations handbook — ozone observations with a Dobson spectrophotometer. — Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, NOAA/ESRL Global Monitoring Division, 2006. — 91 p.
 10. McPeters R. D., Hollandsworth S. M., Flynn L. E., et al. Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus 7 / Meteor 3 TOMS Version 7 record // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**, N 25. — P. 3699–3702.
 11. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent developments of atmospheric research in Ukraine // *Adv. Astron. Space Phys.* — 2012. — **2**. — P. 114–120.
 12. Redondas A., Evans R., Stuebi R., et al. Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms // *Atmos. Chem. Phys.* — 2014. — **14**. — P. 1635–1648.
 13. Scarnato B., Staehelin J., Stübi R., Schill H. Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988–2007) // *J. Geophys. Res.* — 2010. — **115**. — D13306.
 14. van der A R. J., Allaart M. A. F., Eskes H. Multi sensor reanalysis of total ozone // *Atmos. Chem. Phys.* — 2010. — **10**, N 22. — P. 11277–11294.
 15. Verhoelst T., Granville J., Hendrick F., et al. Metrology of ground-based satellite validation: co-location mismatch and smoothing issues of total ozone comparisons // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* — 2015. — **8**. — P. 8023–8082.
- Стаття надійшла до редакції 15.01.18
- ## REFERENCES
1. Aleksandrov E. L., Izrael Ju. A., Karol I. L., Khrgian A. Kh. Earth's ozone shield and its changes, 288 p. (Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 1992) [in Russian].
 2. Grytsai A. V., Milinevsky G. P. Analysis of the discrepancy between ground-based and satellite total ozone content measurements at Kyiv-Goloseyev station. *Space Science and Technology*, **20** (1), 3–13 (2014) [in Ukrainian].
 3. Mogylchak V. Y., Milinevskiy G. P. Variations of total ozone in the atmosphere over the territory of Ukraine. *Space Science and Technology*, **23** (2), 41–47 (2017) [in Ukrainian].
 4. Antón M., Mateos D. Shortwave radiative forcing due to long-term changes of total ozone column over the Iberian Peninsula. *Atmos. Environ.*, **81**, 532–537 (2013).
 5. Basher R. E. Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy. Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. N 13, 94 p. (1982).
 6. Dobson G. M. B., Normand C. W. B. Determination of the constants etc. used in the calculation of the amount of ozone from spectrophotometer measurements and of the accuracy of the results. *Ann. Int. Geophys. Year*, **16** (Part II), 161–191 (1962).
 7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes. *Rem. Sens. Lett.*, **5** (3), 205–212 (2014).
 8. Fioletov V. E., Labow G., Evans R., et al. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data. *J. Geophys. Res.*, **113** (D14), D14313 (2008).
 9. Komhyr W. D., Evans R. D. Operations handbook — ozone observations with a Dobson spectrophotometer. Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, NOAA/ESRL Global Monitoring Division, 91 p. (2006).
 10. McPeters R. D., Hollandsworth S. M., Flynn L. E., et al. Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus 7 / Meteor 3 TOMS Version 7 record. *Geophys. Res. Lett.*, **23** (25), 3699–3702 (1996).
 11. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent developments of atmospheric research in Ukraine. *Adv. Astron. Space Phys.*, **2**, 114–120 (2012).
 12. Redondas A., Evans R., Stuebi R., et al. Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 1635–1648 (2014).
 13. Scarnato B., Staehelin J., Stübi R., Schill H. Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988–2007). *J. Geophys. Res.*, **115**, D13306 (2010).
 14. van der A R. J., Allaart M. A. F., Eskes H. Multi sensor reanalysis of total ozone. *Atmos. Chem. Phys.*, **10** (22), 11277–11294 (2010).
 15. Verhoelst T., Granville J., Hendrick F., et al. Metrology of ground-based satellite validation: co-location mismatch and smoothing issues of total ozone comparisons. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **8**, 8023–8082 (2015).
- Received 15.01.18
- А. В. Грицай ¹, Г. П. Милиневский ^{1, 2, 3}
- ¹ Киевський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
- ² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Київ, Україна
- ³ Международный центр науки будущего, Цзилинский университет, Чанчунь, Китай
- ## ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ОЗОНА НАД СТАНЦИЕЙ КИЕВ-ГОЛОСИИВ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В 2010–2015 гг.
- Наземные измерения общего содержания озона (ОСО) в единицах Добсона (ЕД) проводятся с помощью спектрофотометра Добсона на станции Киев-Голосиив с

мая 2010 г. В этой работе выполняется исследование расхождений между спутниковыми и наземными наблюдениями *OCO* в атмосфере над данной станцией. Для сравнения использованы отдельные наблюдения вблизи наземной станции и построенные на их основании модели с шестичасовым шагом. Определено, что минимальные годовые средние значения *OCO* фиксировались в 2011 г. (319...322 ЕД в зависимости от типа наблюдений), а максимальные — в 2013 г. (327...338 ЕД). Согласно результатам сопоставления со спутниковыми измерениями, для спектрофотометра Добсона № 040 станции Киев-Голосиив хорошее качество демонстрируют ряды наблюдений типов DSAD, DSCD и ZBAD (за исключением DSCD для 2015 г.). Наблюдения ZBCD и ZC оказываются неустойчивыми относительно средних разностей, а удвоенные среднеквадратические отклонения, вычисленные на протяжении календарного года, регулярно превышают 25 ЕД. Разность между спутниковыми и наземными данными демонстрирует сезонный цикл с относительной недооценкой *OCO* при наземных наблюдениях в конце осени — начале зимы. Главная причина видится в некотором занижении DSAD-значений вблизи момента зимнего солнцестояния. Указанное явление в первую очередь ухудшает качество AD-данных вследствие быстрого спада интенсивности излучения в коротковолновой паре А при увеличении зенитного расстояния Солнца (возрастает влияние рассеянного света). Типичные значения расхождения достигают 20 ЕД, а иногда и больше. Расхождения увеличиваются при высоком содержании озона. Наоборот, CD-значения в таких условиях оказываются завышенными по сравнению с модельными.

Ключевые слова: общее содержание озона, спектрофотометр Добсона, спутниковые измерения, ряды наблюдений, сравнение данных.

A. V. Grytsai¹, G. P. Milinevsky^{1,2,3}

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

² Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ International Center of Future Science, Jilin University, Changchun, China

TOTAL OZONE CONTENT OVER KYIV-GOLOSEYEV STATION BY GROUND-BASED AND SATELLITE MEASUREMENTS IN 2010—2015

Ground-based measurements of total ozone content (TOC) in Dobson Units (DU) over Kyiv-Goloseyev station using

Dobson spectrophotometer are carried out from May 2010. The ground-based measurements are realized under Direct Sun (DS), Zenith Blue (ZB), and Zenith Cloud (ZC) conditions in the standard pairs of wavelengths A, C, D in near ultraviolet range (300—340 nm). In this work, the discrepancies between satellite and ground-based TOC observations in the atmosphere over the station are studied. Besides, both seasonal TOC variations and changes in the differences between satellite and ground-based measurements are considered. First task of the work is to study main features of the seasonal TOC variations at Kyiv-Goloseyev station. Second task is to estimate the level of distinctions between satellite and ground-based TOC values and to determine possible causes of the distinctions. We processed the Kyiv-Goloseyev Dobson DS, ZB, and ZC double-pair (AD and CD) measurements of total ozone content using the satellite OMI/Aura, GOME-2/MetOpA, and GOME-2/MetOpB data. For the comparison, both separate measurements made in the vicinity of the ground-based station and the corresponding models with 6-hour step were considered. The differences between satellite (model) and ground-based data are studied separately for each type of the Dobson observations. It was determined that minimal annual mean TOC values were registered in 2011 (319—322 DU in dependence on measurement type) and maximal values were reached in 2013 (327—338 DU). The difference between the satellite and ground-based data has exhibited a seasonal cycle with relative TOC underestimation in the ground-based measurements at the late autumn and early winter. A decrease in the DSAD values near the winter solstice moment is seen as the main cause of the underestimation. Firstly, an indicated phenomenon worsens the AD data quality because of the fast decrease of radiation intensity in the short-wave A pair, what happens when solar zenith angle rises, and scattered light has a greater impact. Typical values of the discrepancy reach 20 DU and sometimes even greater. Discrepancies increase with high ozone content above 400 DU. On the contrary, the CD values are overestimated under those conditions as compared with model ones. According to the results of comparison with satellite measurements, the Kyiv-Goloseyev Dobson spectrophotometer No. 040 demonstrates the high quality in cases of DSAD, DSCD, and ZBAD series (excluding DSCD in 2015). The ZBCD and ZC data seem to be unsteady for mean differences, and double standard deviations calculated during a calendar year regularly exceed 25 DU.

Keywords: total ozone content, Dobson spectrophotometer, satellite measurements, observational series, data comparison.

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, О. Кронберг³, А. Прохоренков¹,
О. Григоренко⁴, О. Черемних², С. Черемних², Е. Луї⁵, П. Козак¹, І. Кунделько¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України, Київ, Україна

³ Інститут Макса Планка, Геттінген, Федеративна Республіка Німеччина

⁴ Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Російська Федерація

⁵ Університет імені Джона Хопкінса, Балтимор, США

ТУРБУЛЕНТНІ ПРОЦЕСИ У ХВОСТІ МАГНІТОСФЕРИ ЗЕМЛІ: СТАТИСТИЧНИЙ ТА СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Дослідження процесів у хвості магнітосфери істотно ускладнюються наявністю турбулентності за рахунок розвитку нестійкостей, у результаті яких відбувається «катастрофічна» перебудова потоку і структури магнітного поля. Складні турбулентні процеси, які спостерігаються у магнітосфері Землі, не вдається описати в рамках аналітичних моделей МГД-течій. Для розгляду властивостей турбулентності на великих часових і просторових масштабах слід залучати методи статистичної фізики і каскадні моделі, розвинені в гідродинамічних теоріях. При цьому з експерименту вдається визначити статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю. Даний підхід дозволяє отримати уявлення про фізичні властивості турбулентності плазми і дає можливість якісно і кількісно описати процеси переносу в турбулентних областях. В ході роботи проаналізовано властивості дрібномасштабної розвиненої турбулентності у хвості магнітосфери Землі за вимірами ферозондових магнітометрів трьох космічних апаратів місії «Кластер-2» з частотою опитування 22.5 Гц для 17 жовтня 2005 року. Для досягнення поставленої цілі було використано фрактальні та мультифрактальні методи дослідження, які були доповнені спектральним та вейвлет-аналізом. Зокрема було проведено: аналіз крил функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля (фрактальний розгляд); аналіз розширеної самоподібності (ESS-аналіз, мультифрактальний розгляд); аналіз спектральної густини потужності (спектральні дослідження); аналіз амплітуди та wavelet power spectral сигналу (вейвлет-аналіз). В ході виконання роботи отримані залежності порівнювалися з наявними на сьогодні моделями опису як однорідних, так і неоднорідних турбулентних процесів. В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що функція розподілу флуктуацій магнітного поля під час суббурі вказує на негауссову статистику процесів, а також на надлишок великомасштабних збурень, що генеруються джерелом. При порівнянні структурних функцій флуктуацій магнітного поля під час ініціації суббурі із моделями Колмогорова, Крейчнана та ізотропною логнуасонівською 3D-моделлю із параметрами Ше і Левека отримано, що дані турбулентні процеси неможливо описати ізотропними однорідними моделями, і, крім того, вони характеризуються наявністю супердифузії. Відмічається суттєва відмінність спектрального індексу для моментів до і під час ініціювання суббурі: так, до суббурі спектральний індекс приблизно відповідає до моделі Колмогорова, а під час суббурі він близький до індексу у моделі електрон-магніто-гідродинамічної турбулентності. Вейвлет-аналіз показав наявність як прямих, так і зворотних каскадних процесів, а також наявність Рс-пульсацій.

Ключові слова: турбулентні процеси, хвіст магнітосфери Землі, моделі розвитку суббурі, Рс-пульсації, спектри турбулентності у хвості магнітосфери Землі.

ВСТУП

На сьогоднішній день є два основних сценарії розвитку суббурі які відрізняються локалізацією — у першому підході, модель CD (Current Disruption — розрив струмового шару), суббуря розвивається на відстанях 6...15 радіусів Землі за рахунок маломасштабних розривів [6, 7, 28, 29], в іншому, модель NENL (Near-Earth Neutral Line), передбачається ініціація всередині хвоста на відстанях 15—30 радіусів Землі за рахунок великомасштабних процесів, які включають перез'єднання силових ліній [6, 7]. При цьому характер розвитку буде залежати як від процесів у сонячному вітрі, так і від внутрішнього стану магнітосфери безпосередньо до початку фази розширення. Протиставлення даних двох теорій розвитку суббурі відбувається тому, що у їхній основі закладено різні механізми кінетичної нестійкості. Для моделі NENL це головним чином розривна нестійкість, що розбиває струмовий шар на «магнітні волокна». Для моделі CD — нестійкість струму, що тече впоперек хвоста, яка визначається відношенням дрейфової і теплової швидкості іонів. Ця нестійкість має нижчий поріг, ніж розривна, тому її розвиток може створювати необхідні умови для початку магнітного перез'єднання [18, 30]. Обидва сценарії мають спільні закономірності: магнітне перез'єднання та неминуче поширення диполяризації у хвостову частину [29, 33]. Завдяки цьому вони однаково успішно забезпечують правильну інтерпретацію проявів суббурі, таких як прискорення частинок, диполяризацію, утворення струмового клину, інжекцію [6, 7]. Крім того, в рамках CD-моделі момент настання суббурі випереджає перез'єднання, а в рамках NENL — навпаки. Для перевірки цього порівнюють моменти початку суббурі на Землі з часом проходження супутника через область перез'єднання. Виявилося, що численні спостереження підтверджують першу і другу парадигму. При цьому різниця між цими моментами складає лише декілька хвилин, а точне їхнє знаходження ускладнюється наявністю так званих псевдорозривів [6, 27—29, 34].

Суттєву роль в характеристиках розвитку суббурі відіграють і важкі іони. Їхня наявність призводить до зміни товщини струмового шару та

його структури, зміни умов магнітного перез'єднання та виникнення нестійкості Кельвіна — Гельмгольца [26]. Важкі іони у магнітосфері мають переважно іоносферне походження за рахунок трьох факторів: сонячного жорсткого ультрафіолетового випромінювання, електромагнітної енергії при перез'єднанні на магнітопаузі та прискорення електронів. Перший фактор відповідає за іонізацію нейтральних компонентів, нагрівання та дисоціацію молекул. Другий та третій фактори спричинені змінами в сонячному вітрі та міжпланетному магнітному полі. Передостанній є фактично потоком вектора Пойтінга, який утворився внаслідок джоульовської дисипації. Ці ефекти підвищують температуру іонізованого компонента, а отже і висоту його перебування. На таких висотах взаємодія хвиля — частинка прискорює іони далі — у магнітосфері [6, 26].

Дослідження процесів у хвості магнітосфери істотно ускладнюються наявністю турбулентності за рахунок розвитку нестійкостей, у результаті яких відбувається «катастрофічна» перебудова потоку і структури магнітного поля [1, 8, 9]. Складні турбулентні процеси, які спостерігаються у магнітосфері Землі, не вдається описати в рамках аналітичних моделей МГД-течій. Для розгляду властивостей турбулентності на великих часових і просторових масштабах слід залучати методи статистичної фізики і каскадні моделі, розвинені в гідродинамічних теоріях. При аналізі дуже важливим є дослідження властивостей турбулентності в залежності від масштабу. Необхідно також враховувати, що властивості турбулентних процесів пов'язані не стільки з фізичними механізмами розвитку нестійкостей, скільки з симетріями, що описують масштабну інваріантність [36, 38].

Аналітично або чисельно розв'язати задачу про динаміку турбулентної плазми (у тривимірній геометрії) і визначити особливості турбулентності на великих часових масштабах в даний час не вдається, тому з експерименту визначають статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю, і отримують оцінки для показників степеня залежності параметрів плазми у припущенні степеневих законів.

Це дозволяє отримати уявлення про фізичні властивості турбулентності плазми і дає можливість якісно і кількісно описати процеси переносу в турбулентних областях [2, 4, 17, 23].

В ході виконання роботи статистичний розгляд особливостей розриву струмового шару у хвості магнітосфери Землі (подія 17 жовтня 2005 р.) доповнено спектральними дослідженнями: фур'є-та вейвлет-аналіз. При цьому вейвлет-розгляд дозволяє простежити за зміною спектральних властивостей сигналу з часом та вказати які частоти (масштаби) домінують в сигналі в кожен конкретний момент. Але слід відмітити, що спектральний аналіз, крім найпростіших випадків, не дозволяє визначити тип турбулентних процесів, особливо при наявності неоднорідності турбулентних процесів (переміжності).

МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ

Статистичний аналіз. Розподіл ймовірностей амплітуд флуктуацій найпростішого випадкового процесу підпорядковується гауссівському закону [2, 13, 22]. З поведінки функції розподілу густини ймовірності (*PDF*) можна визначити характерний просторовий або часовий масштаб, що визначається кроком, на якому *PDF* сигналу втрачає властивість гауссовості. При наявності неоднорідності турбулентних процесів ми спостерігаємо значне «розпливання» *PDF*. Вірогідність значних флуктуацій на крилах розподілу буде високою завдяки надлишку енергії великомасштабних збурень, що генеруються джерелом.

В теорії Колмогорова розглядаються структурні функції (моменти) порядку q для різниці швидкостей на просторовому масштабі, $v = v(x + l) - v(x)$, $S_q(l) \equiv \langle |\delta v|^q \rangle$, або в часі на масштабі τ , $\delta_\tau v = v(t + \tau) - v(t)$, $S_q(\tau) \equiv \langle |\delta_\tau v|^q \rangle$. Для турбулентного поля $X(t)$ структурна функція порядку q визначається як статистичне середнє по ансамблю співвідношень $\delta_\tau X = X(t + \tau) - X(t)$, $S_q(\tau) = \langle |\delta_\tau X|^q \rangle$. Статистичне усереднення $\langle \dots \rangle$ відбувається з ваговою функцією — функцією розподілу для $\delta_\tau X$. Дослідження структурних функцій еквівалентне дослідженню функції розподілу турбулентних флуктуацій. З практичної точки зору дослідити структурні функції простіше, їх можна вимірювати в експерименті. Метод структурних функ-

цій дозволяє детально описати неоднорідність розподілу на різних масштабах процесу. Для ізотропної розвиненої турбулентності Колмогоров розглянув турбулентний каскад і припустив, що в інерційному інтервалі $\eta \ll l \ll L$ (η — дисипативний, а L — глобальний масштаб) при великих числах Рейнольдса всі статистично усереднені моменти $S_q(l)$ поля швидкостей v на масштабі l залежать лише від середньої швидкості дисипації ϵ_l і даного масштабу l (властивість локальності). Ця теорія А. Н. Колмогорова була названа K41 [5]. В інерційному діапазоні теорія K41 припускає статистичну квазірівновагу флуктуацій і гауссівську статистику пульсацій швидкостей. Динаміка інерційного діапазону не залежить від способу генерації турбулентності і визначається інваріантом потоку енергії через цей інтервал: середній потік енергії зберігається. Скейлінги (тобто закони масштабної інваріантності) для $S_q(l)$ і для енергії дисипації ϵ_l при цьому [5, 35]:

$$S_q(l) \propto \langle |\delta v|^q \rangle \propto l^{\zeta(q)}, \langle \epsilon_l^q \rangle \propto l^{\tau(q)}$$

з взаємозалежними показниками $\zeta(q) = q/3 + \tau(q/3)$. Із міркувань розмірності А. Н. Колмогоров вивів знаменитий закон для спектру потоку енергії $E_k \propto k^{-5/3}$ (закон «п'яти третіх» для розвиненої ізотропної турбулентності в інерційному діапазоні). У моделі K41 $\zeta(q) = q/3$, що відображає факт однорідності турбулентних процесів. Нелінійна залежність $\zeta(q)$ від порядку q свідчить про іррегулярний перерозподіл енергії в турбулентних каскадах та порушення локальної однорідності турбулентності — «переміжності» (чергування вихорів з квазіламінарними потоками), а також вказує на відхилення *PDF* від гауссового закону.

У моделі Колмогорова K41 основним є припущення про локальний характер турбулентності. Це означає, що в інерційному інтервалі зміна енергії на даному масштабі визначається взаємодією тільки вихорів, які мають близькі значення хвильових чисел і тривалий час (більший ніж час «обертання» вихору) взаємодіють між собою. Взаємодія вихорів з сильно різними розмірами мала. У моделі K41 турбулентні вихори кожного масштабу однорідно заповнюють весь простір.

Наявність магнітних полів в міжпланетному середовищі може викликати сильну анізотропію

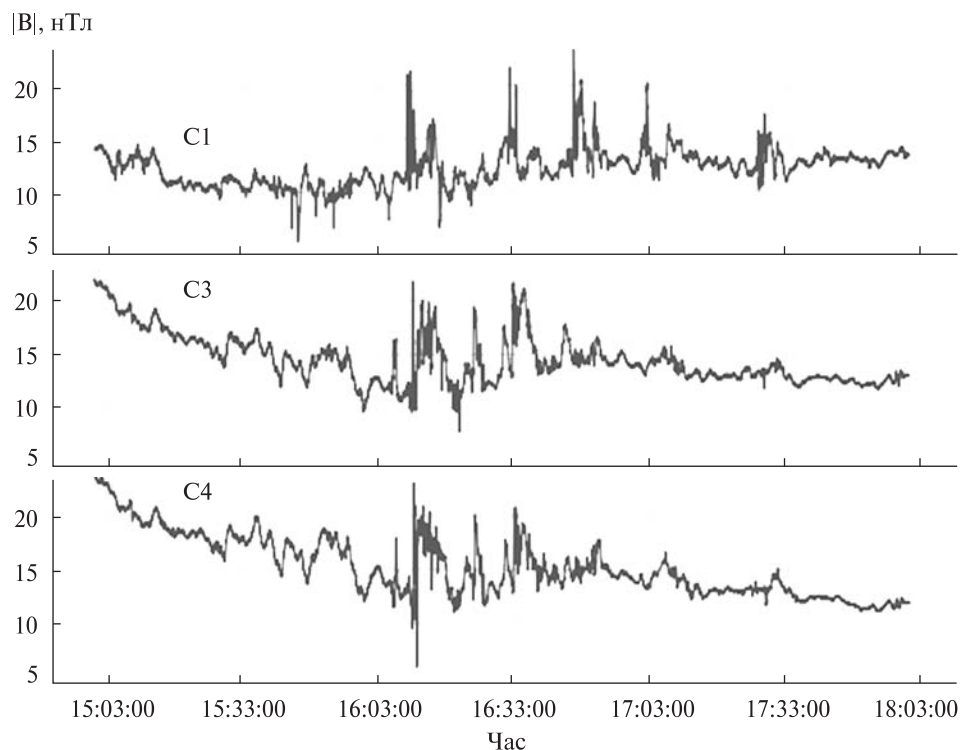


Рис. 1. Проаналізовані флуктуації магнітного поля космічних апаратів C1, C3 та C4 космічної місії «Кластер»

динамічних процесів у плазмі. Спробою адаптувати модель K41 до замагніченого середовища є двовимірною моделлю Ірошнікова — Крейчнана (ІК) [24, 25]. В рамках цього розгляду турбулентні збурення є малими по амплітуді і схожі на хвильові збурення, що поширюються уздовж середнього поля (альвенівська турбулентність). Спектр енергії для моделі ІК задається співвідношенням $E_{IK}(k) = \langle |\delta v(k)|^2 \rangle k^2 \propto k^{-3/2}$. При цьому у порівнянні з колмогорівським спектром значно зменшується рівень передачі енергії на малих масштабах і збільшується час передачі енергії. Залежність для структурних функцій в моделі ІК: $S_q(l) \propto l^{q/4}$.

У підході Крейчнана перебільшується вплив великомасштабних флуктуацій на еволюцію дрібномасштабних неоднорідностей: цей вплив зводиться до перенесення дрібномасштабних флуктуацій з малою їхньою деформацією (адіабатичне наближення). Незважаючи на недоліки, модель ІК широко використовується у багатьох роботах (наприклад, для інтерпретації властивостей турбулентності міжпланетної плазми, плазми в токамаках тощо).

Для аналізу моментів функції розподілу визначальною є наявність властивості розширеної самоподібності (ESS — extended self-similarity) [11]. При відносно низьких значеннях чисел Рейнольдса, коли у звичайному представленні $S_q(l) \propto l^{\zeta(q)}$ інерційний інтервал не виявляється, спостерігається залежність

$$S_q(l) \propto S_3(l)^{\zeta(q)/\zeta(3)}$$

для розширеного діапазону масштабів $l \geq 5\eta$, η — колмогорівський масштаб дисипації. Така властивість (її ще називають самоподібністю) спостерігається майже до масштабів дисипації.

Це феноменологічне спостереження призвело до вироблення критерію узагальненої самоподібності для довільної пари структурних функцій

$$S_q(l) \propto S_p(l)^{\zeta(q)/\zeta(p)}.$$

Передбачається, що така самоподібність є проявом прихованих статистичних симетрій і

характеризує флуктуації в турбулентних потоках з переміжністю для великого діапазону чисел Рейнольдса. Використовуючи властивість розширеної самоподібності можна знайти з досить високою точністю $\zeta(q)$ і оцінити тип турбулентних процесів. При цьому нелінійна функціональна залежність $\zeta(q)$ від порядку моменту q для експериментальних даних є наслідком переміжності процесів. Для інтерпретації нелінійного спектру $\zeta(q)$ застосовують лог-пуассонівські моделі турбулентності, в яких показник степеня структурної функції визначається співвідношенням [3, 14, 37]:

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} [1 - \beta^{q/3}],$$

де β і Δ — параметри, які характеризують переміжність і сингулярність дисипативних процесів відповідно. Важливо, що в рамках даної моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, і логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом. Для ізотропної тривимірної турбулентності Ше і Левек [37] запропонували $\Delta = \beta = 2/3$.

На практиці в результаті проведеного ESS-аналізу можна отримати значення параметрів лог-пуассонівської моделі β й Δ і використати їх для визначення особливостей турбулентного переносу плазми. У такому підході коефіцієнт узагальненої дифузії визначається через параметри структурної функції $\zeta(q)$ (переміжність і сингулярність) співвідношенням [12, 32, 40]

$$D \propto \tau^R, R = \Delta(1/\beta - 1).$$

Такий підхід використовується для оцінки переносу у статистично неоднорідному середовищі, а показник R у загальному випадку визначається фрактальними властивостями середовища.

Спектральний аналіз. Найбільш грубою характеристикою турбулентного середовища є спектральний індекс, що характеризує зміну спектральної густини потужності в інерційному інтервалі. При цьому інерційний інтервал обмежений низькими частотами, пов'язаними з великомасштабними джерелами енергії, і частотами, які відповідають дрібномасштабним дисипативним (кінетичним) процесам. Основним припущенням при статистичному (мультифрактальному) аналі-

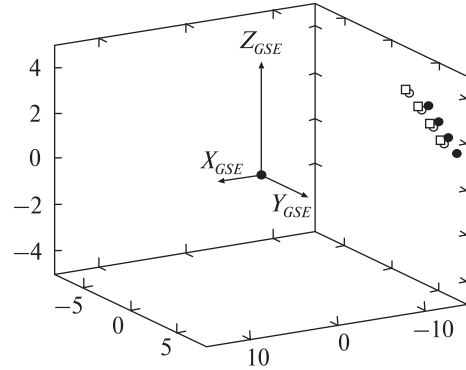


Рис. 2. Траєкторії космічних апаратів в GSE-системі координат (світлі кружки — КА C1, квадратики — КА C3, темні кружки — КА C4)

зу є те, що сигнал, який ми розглядаємо, приймається стаціонарним, тобто характерні часи не змінюються у межах розглянутого інтервалу. Однак для дуже динамічної ситуації нестационарність сигналу не може бути виключена. Тому було проведено спектральний і вейвлет-аналіз.

У рамках аналізу спектральної густини потужності (PSD) сигналу для серії N вимірів X_n було використано дискретне фур'є-перетворення в вигляді [31]:

$$PSD = \frac{2N}{f_s} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp\left(\frac{2\pi i n j}{N}\right) \right|^2,$$

де $n = 0, 1, \dots, N-1, j = 0, 1, \dots, N/2$.

В рамках вейвлет-аналізу для серії вимірів X_n ($n = 0, \dots, N-1$) зі зсувом по часу δt було використано вейвлет Морле з огинаючою гауссіаною [39]:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2},$$

де ω_0 — безрозмірна частота, η — безрозмірний «часовий» параметр. Індекс «0» у функції ψ вказує, що ця функція є нормованою.

Неперервне вейвлет-перетворення дискретного сигналу x_n визначається як згортка материнського вейвлету, аргумент якого масштабують та транслюють, з сигналом [15, 16, 19]:

$$W_n(s) = \sum_{n'} x_{n'} \psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right],$$

де зірочкою позначено комплексне спряження, $|W_n(s)|^2$ — вейвлет-спектр потужності сигналу, s — вейвлет-шкала.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Для аналізу характеристик турбулентних процесів у хвості магнітосфери Землі було використано виміри ферозондових магнітометрів трьох космічних апаратів місії «Кластер-2» з частотою опитування 22.5 Гц у момент розриву струмового шару 17 жовтня 2005 р. Слід відмітити, що для проведення коректного аналізу флуктуацій магнітного поля наявність експериментальних даних із високою частотою опитування є дуже актуальною, особливо на малих масштабах.

Розглянуті зміни флуктуацій абсолютного значення магнітного поля при русі космічних апаратів у хвості магнітосфери Землі приведено на рис. 1. Початок суббури для КА — 16:10. Із рисунків добре видно, що під час розвитку суббури відносний рівень флуктуацій магнітного поля зростає у 2—3 рази. Всі три космічні апарати фіксують диполаризацію магнітного поля і ініціацію суббури у просторовому діапазоні $-10R_E < X_{GSE} < -14R_E$, $5R_E < Y_{GSE} < 9R_E$ і $1R_E < Z_{GSE} < 4R_E$ (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У рамках досліджень визначалися зміни флуктуацій магнітного поля на різних часових масштабах. Використання даного підходу для визначення типу турбулентності виправдане, якщо вимірювання проводяться у середовищі з великою

відносною швидкістю через правомірність гіпотези Тейлора [21, 20, 22].

Для дослідження особливостей функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля P вибирався зсув по часу, кратний дискретності вимірів $\tau_{\min} = 0.0445$ с. Аналізувалися статистичні властивості абсолютного значення варіацій магнітного поля $dB = B(t + \tau) - B(t)$ для моментів до, під час і після ініціювання суббури на різних часових масштабах. На рис. 3 подано приклади розподілів для часових зсувів. Добре видно, що до початку розвитку суббури крила набагато менші, ніж для інших розглянутих ситуацій. Найбільші крила, тобто найбільше відхилення розподілу флуктуацій від нормального процесу, спостерігаються під час суббури.

Із отриманих залежностей можна зробити висновок, що для малих масштабів під час суббури розподіл помітно відхиляється від гауссівського.

Для визначення типу турбулентних процесів, що спостерігаються в експерименті, було проведено аналіз особливостей структурних функцій (моментів функції густини ймовірності) різних порядків q відповідно до часового інтервалу τ для ряду даних $B(t)$. Структурні функції високих порядків дозволяють охарактеризувати властивості неоднорідності на малих масштабах процесу. При цьому структурна функція визначалася співвідношенням

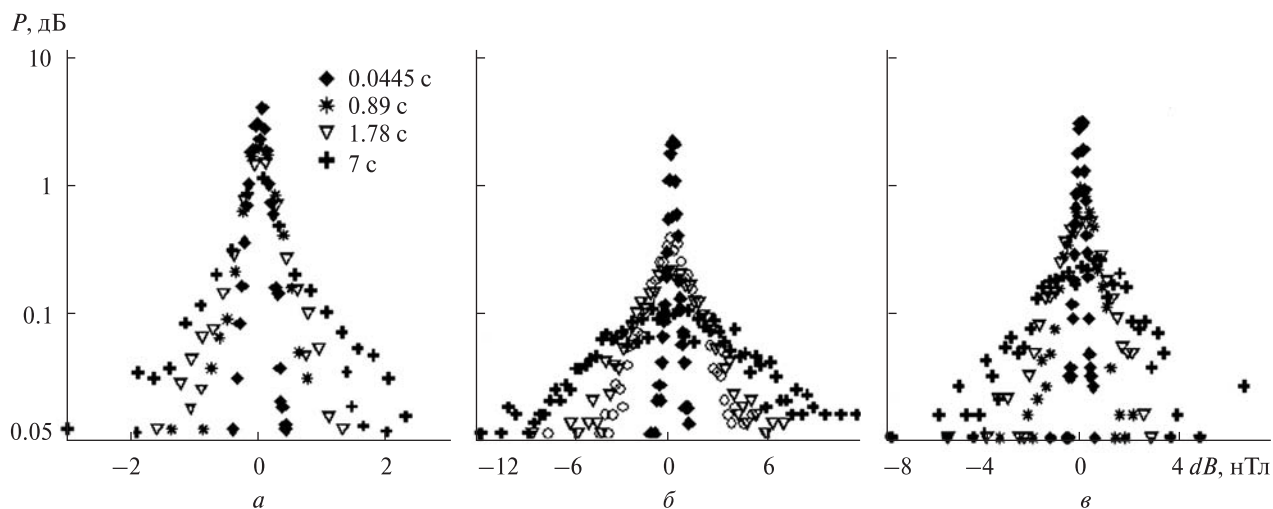


Рис. 3. Залежність функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля від кроку по часу (КА C1): а — до початку суббури, б — під час суббури, в — після суббури

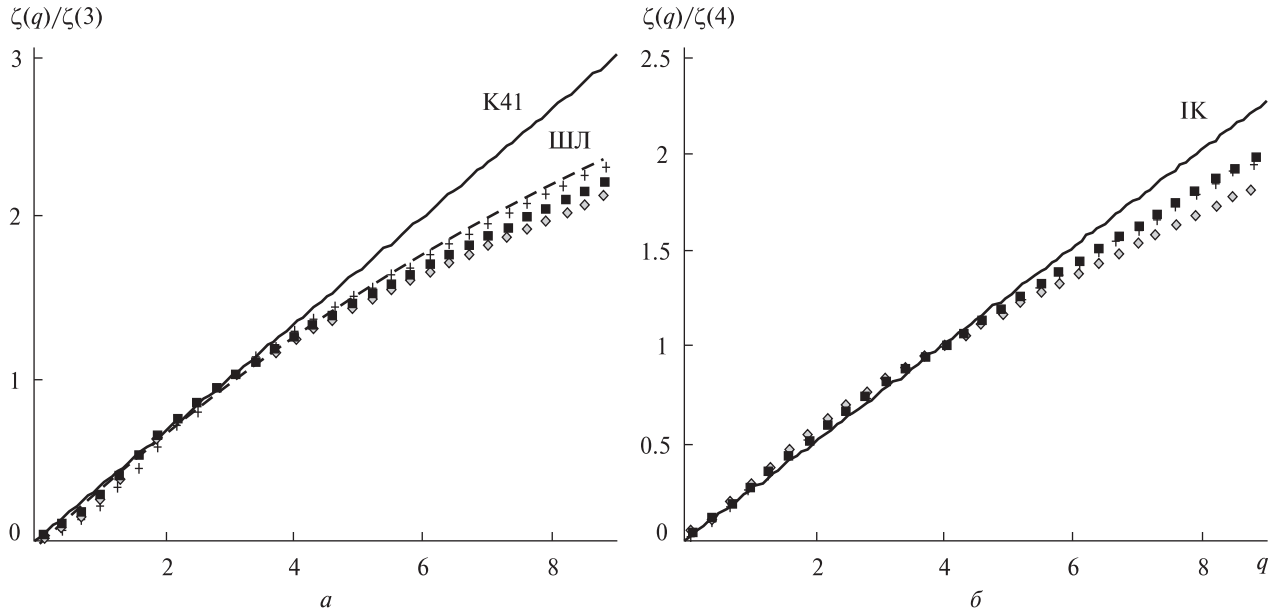


Рис. 4. Відношення експоненціального значення $\zeta(q)$ структурної функції порядку q : a — до значення $\zeta(3)$ третього порядку (суцільна лінія — модель K41, штрихова — ізотропна лог-пуассонівська каскадна модель Ше—Левека (ШЛ)); b — до значення $\zeta(4)$ четвертого порядку (суцільна лінія — модель IK). Хрестики, ромбики та кружки — експериментальні дані КА C1, C3 та C4 відповідно

$$S_q(\tau) = \langle |B(t+\tau) - B(t)|^q \rangle \propto \tau^{\zeta(q)},$$

де $\langle \dots \rangle$ означає усереднення експериментальних даних за часом, а τ — зсуву по часу.

Для лог-пуассонівської ізотропної турбулентної каскадної 3D-моделі маємо залежність [37]

$$\zeta(q) = \frac{q}{9} + 2 \left[1 - \left(\frac{2}{3} \right)^{q/3} \right].$$

На практиці властивість узагальненої самоподібності дозволяє підвищити точність визначення степеня структурної функції при аналізі експериментальних даних. Параметр $\zeta(q)/\zeta(3)$ може бути отриманий з нахилу графіка в логарифмічному масштабі. При цьому будемо мати порівняння експериментальних даних із колмогорівською моделлю турбулентності K41, для якої $\zeta(3) = 3/3 = 1$. Для порівняння ж експериментальних значень із моделлю двовимірної турбулентності Ірошнікова — Крейчнана знаходять залежність $\zeta(q)/\zeta(4)$, оскільки для неї $\zeta(4) = 4/4 = 1$.

Степенева залежність типу $S_q(\tau) \propto \tau^{\zeta(q)}$ (самоподібність) спостерігається лише на обмежено-

му інтервалі часових масштабів. Цей інтервал відповідає інерційному діапазону, що розглядається у класичних моделях ізотропної розвиненої турбулентності (K41 та ін.). Саме інтервал, на якому має місце степенева зв'язок, і вибирають для ESS-аналізу.

Таблиця 1. Параметри дифузійних процесів

Космічний апарат	β	Δ	$R = \Delta(1/\beta - 1)$
C1	0.58	0.51	0.37
C3	0.42	0.48	0.66
C4	0.54	0.55	0.47

Таблиця 2. Спектральні індекси PSD-аналізу

Космічний апарат	До суббурі	Під час суббурі	Після суббурі
C1	-1.7386 ± 0.0516	-2.4320 ± 0.0552	-1.8134 ± 0.0432
C3	-1.5699 ± 0.0508	-2.6340 ± 0.0482	-1.6789 ± 0.0611
C4	-1.9672 ± 0.0494	-2.5089 ± 0.0303	-1.9974 ± 0.0578

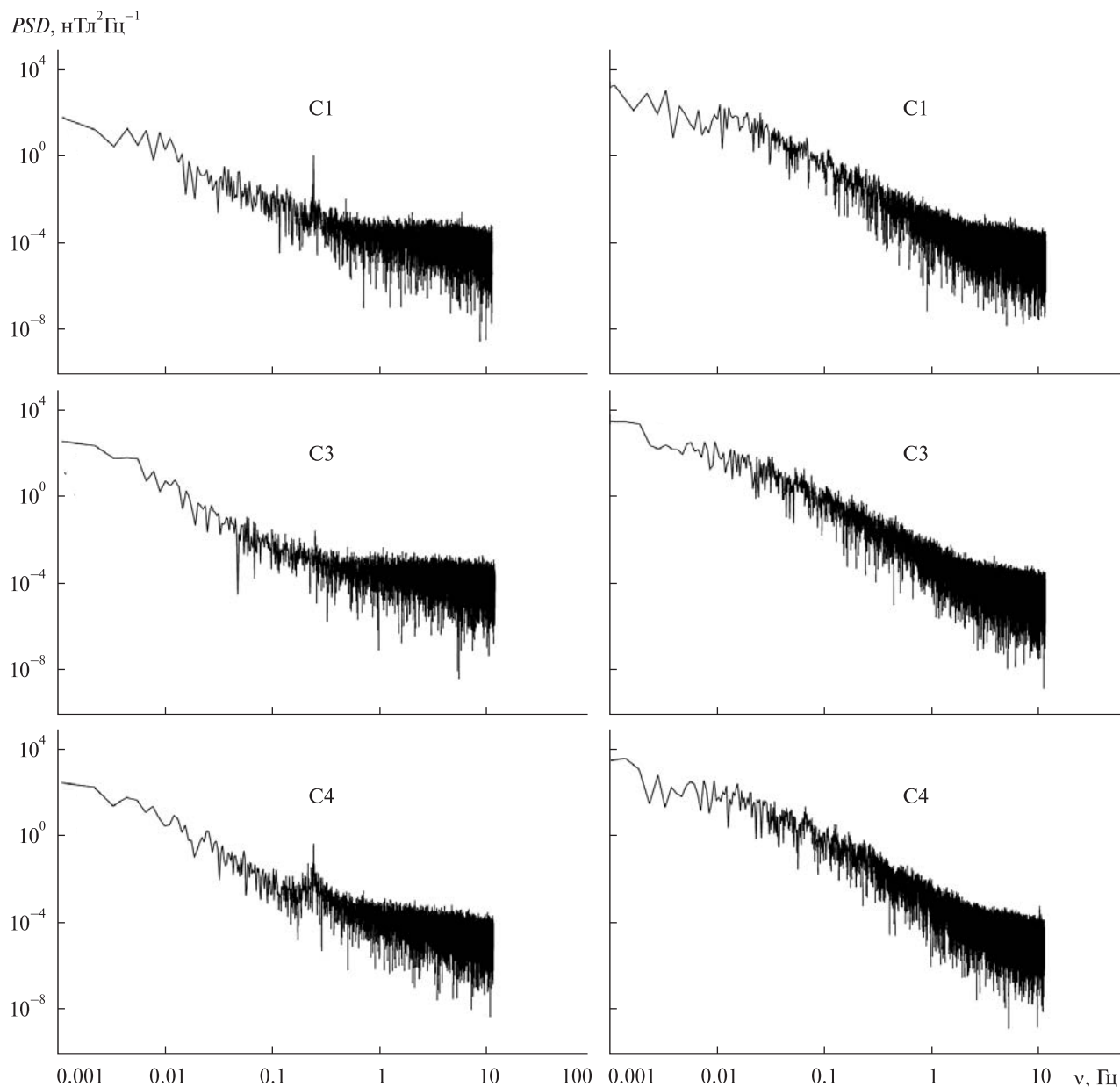


Рис. 5. Результати спектрального аналізу для моментів до (зліва) та під час (справа) ініціації суббури для КА C1, C3, C4

Результати розрахунку скейлінгів моментів функції густини ймовірності для різних порядків q при аналізі маломасштабної турбулентності та порівняння їх із колмогорівською моделлю та двовимірною моделлю Ірошнікова — Крейчна показані на рис. 4. Результати ESS-аналізу супутникових вимірів вказують на неоднорідність турбулентних процесів під час ініціації суббури,

описати які можна лог-пуассонівською каскадною моделлю із параметрами підгонки.

В результаті проведеного ESS-аналізу можна із рис. 4, а отримати значення параметрів лог-пуассонівського скейлінгу β і Δ під час суббури (табл. 1) і використати їх для визначення узагальненого коефіцієнта дифузії. Отримані значення R лежать в межах 0.37...0.66. Враховуючи,

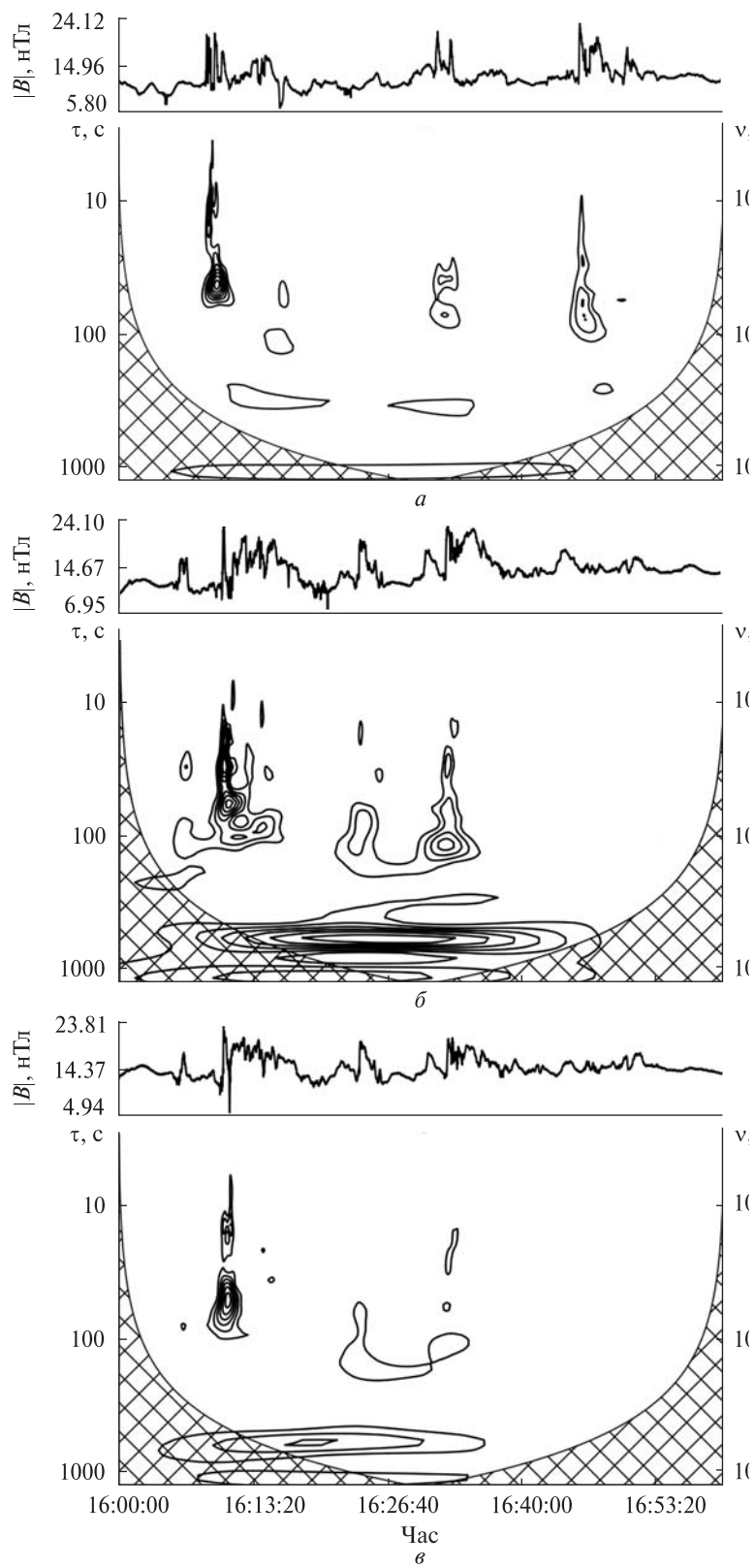


Рис. 6. Результати вейвлет-аналізу вимірів КА C1 (а), КА C3 (б), КА C4 (в)

що закон зміщення частинок з часом задається співвідношенням $\langle \delta x^2 \rangle \propto D\tau \propto \tau^\delta$ з показником $\delta \approx 1 + R \approx 1.37 \dots 1.66 > 1$, то така залежність вказує на процес супердифузії.

Про наявність різних характерних масштабів свідчать і результати спектрального аналізу (рис. 5). На рис. 5, крім зламу в околі частоти 1 Гц, чітко видно пік на частоті 0.25 Гц, що відповідає частоті обертання супутника.

Спектральні індекси в частотному діапазоні 0.01...1 Гц для розглянутих космічних апаратів представлено у табл. 2

Під час ініціації суббурі нахил спектру збільшується. Найбільше значення спостерігається для КА С4. До та після суббурі спектральні індекси лежать у межах 1.57...1.97.

Порівняння результатів вейвлет-аналізу під час суббурі представлено на рис. 6.

Незважаючи на те, що КА С1 перебував на відстанях до декількох радіусів Землі від КА С3 та С4, на графіках чітко видно каскадні процеси, зафіксовані на всіх космічних апаратах. Вони лежать у межах від 0.025 до 0.1 Гц і близькі до іонно-циклотронної частоти O^+ для даних вимірювань магнітного поля. При цьому для С1 і С2 усі каскади мають приблизно однакову потужність. Лише один каскад (з протяжністю у 2 хв і частотною шириною майже у 1 Гц: від 0.02 до 1 Гц) можна точно ідентифікувати в усіх трьох рядах даних, при цьому потужність та протяжність по часу для супутників С3 та С4 зменшується, але частотний діапазон майже не зазнає змін; і два каскади можна однозначно ідентифікувати на близьких супутниках: вони у 2—3 рази слабкіші і мають частоти від 0.005 до 0.5 Гц.

Крім того, під час суббурі на КА С3 та С4 спостерігається потужний сигнал з періодом 550 с і тривалістю 27 хв для третього супутника та 25 хв для четвертого, який відповідає Рс5-пульсаціям.

Таким чином, результати проведеного вейвлет-аналізу вказують на наявність каскадних процесів, здебільшого зворотних, що свідчить про багатомасштабний характер динаміки магнітосфери. І важливо, що при цьому магнітосфера поводить ся як самоорганізована система з різними характерними масштабами.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що відносні варіації магнітного поля під час розриву струмового шару перевищують значення до ініціювання суббурі приблизно в 2—3 рази. Функція розподілу флуктуацій магнітного поля під час розриву струмового шару вказує на негауссову статистику процесів, а також на надлишок великомасштабних збурень, що генеруються джерелом.

При порівнянні структурних функцій флуктуацій магнітного поля під час ініціації суббурі із моделями Колмогорова, Крейчнана та ізотропною лог-пуассонівською 3D-моделлю із параметрами Ше і Левека, отримано, що дані турбулентні процеси неможливо описати ізотропними однорідними моделями. З використанням знайдених в рамках ESS-аналізу значень коефіцієнта переміжності і сингулярності турбулентних процесів отримано степеневу залежність узагальненого коефіцієнта дифузії від масштабу (показник степені варіюється у межах 0.37...0.66), що вказує на наявність супердифузійних процесів.

Одним із важливих результатів є суттєва відмінність спектрального індексу для моментів до і під час суббурі. Так до ініціювання суббурі спектральний індекс лежить у межах від -1.5699 ± 0.0508 до -1.9672 ± 0.0494 ($\sim -5/3$ згідно з моделлю Колмогорова), а під час суббурі значення спектрального індексу варіюється від -2.4320 ± 0.0552 до 2.6340 ± 0.0482 ($\sim -7/3$ — електрон-магнітогідродинамічна турбулентність (ЕМНД)). ЕМНД-теорія описує поведінку плазми із високим параметром β на часових масштабах, менших від іонно-циклотронного періоду, і на просторових масштабах, менших від іонно-інерційної довжини, де переважна частина динаміки плазми регулюється електронами [10].

Вейвлет-аналіз показав наявність як прямих, так і зворотних каскадних процесів, а також наявність РС-пульсацій.

Таким чином, під час суббурі фіксується багатомасштабність і мультифрактальність збурень магнітного поля, а наявність зворотних каскадних процесів вказує також на можливість процесів самоорганізації.

Робота виконувалася відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр. та при підтримці освітньої програми Міністерства освіти і науки України № 2201250 «Освіта, навчання студентів, аспірантів, наукових і педагогічних кадрів за кордоном» (стажування в лабораторії прикладної фізики університету імені Джона Гопкінса, Меріленд, США), гранту 90312 фонду Фольксваген («VW-Stiftung») і Міжнародного інституту турбулентності ISSI-BJ, Пекін, Китай.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И. Турбулентные пограничные слои при очень больших числах Рейнольдса // Успехи мат. наук. — 2004. — **59**, № 1. — С. 45–62.
2. Козак Л. В. Методи і підходи визначення характеристик турбулентного середовища // Космічна наука і технологія. — 2016. — **22**, № 2 (99). — С. 60–77.
3. Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли // Космич. исслед. — 2011. — **49**, № 3. — С. 202–212.
4. Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П., Лежен Л. А., Пилипенко В. А. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2012. — **52**, № 4. — С. 470–481.
5. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. — 1941. — **30**, № 4. — С. 299–303.
6. Космическая геогеофизика / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — М.: Физматлит, 2008. — Том 1. — 624 с.
7. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. — М.: Мир, 1980. — 300 с.
8. Фрик П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. — Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. — Ч. II. — 136 с.
9. Фриш У. Турбулентность: Наследие А. Н. Колмогорова. — М.: Фазис, 1998. — 343 с.
10. Biskamp D., Schwarz E., Drake J. F. Two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence // Phys. Rev. Lett. — 1996. — **76**. — P. 1264–1272.
11. Benzi R., Ciliberto S., Tripiccone R., Baudet C., Mascioli F., Succi S. Extended self-similarity in turbulent flows // Phys. Rev. E. — 1993. — **48**, N 1. — P. 29–32.
12. Chechkin A. V., Gonchar V. Y., Gorenflo R., Korabel N., Sokolov I. M. Generalized fractional diffusion equations for accelerating subdiffusion and truncated Levy flights // Phys. Rev. E. Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. — 2008. — **78**, N 2. — P. 290–302.
13. Consolini G., Kretschmar M., Lui A. T. Y., Zimbardo G., Macek W. M. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach // J. Geophys. Res. Space Phys. — 2005. — **110**, N A7. — P. 1–12.
14. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-poisson statistics and generalized scale covariance // Phys. Rev. Lett. — 1994. — **73**, N 7. — P. 959–962.
15. Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1992. — **24**, N 1. — P. 395–458.
16. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Process. Geophys. — 2004. — **11**, N 5/6. — P. 561–566.
17. Hadid L. Z., Sahraoui F., Kiyani K. H., Retinò A., Modolo R., Canu P., Masters A., Dougherty M. K. Nature of the MHD and kinetic scale turbulence in the magnetosheath of Saturn: Cassini observations // Astrophys. J. — 2015. — **813**, N 2. — 29 p.
18. Handbook of the Solar-terrestrial environment / Eds. Y. Kamide, A. Chian — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. — 539 p.
19. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Influence of the arctic oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach // J. Geophys. Res. Atmos. — 2003. — **108**, N D21. — P. 4677–4708.
20. Kiyani K. H., Chapman S. C., Khotyaintsev Y. V., Dunlop M. W., Sahraoui F. Global scale-invariant dissipation in collisionless plasma turbulence // Phys. Rev. Lett. — 2009. — **103**, N 7. — 75006 (4 p.)
21. Kiyani K. H., Chapman S. C., Sahraoui F., Hnat B., Fauvarque O., Khotyaintsev Y. V. Enhanced magnetic compressibility and isotropic scale invariance at sub-ion Larmor scales in solar wind turbulence // Astrophys. J. — 2013. — **763**, N 1. — 10 p.
22. Kozak L. V., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Prokhorenkov A. S. Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements // J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. — 2017. — **154**. — P. 115–126.
23. Kozak L. V., Prokhorenkov A. S., Savin S. P. Statistical analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of Earth's magnetosphere // Adv. Sp. Res. — 2015. — **56**, N 10. — P. 2091–2096.
24. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers // J. Fluid Mech. — 1959. — **5**. — P. 497–543.
25. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions // J. Fluid Mech. — 1970. — **41**, N 1. — P. 189–217.
26. Kronberg E. A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I., Delcourt D. C., Grigorenko E. E., Kistler L. M., Kuzichev I. V., Liao J., Maggiolo R., Malova H. V., Orlova K. G., Peromian V., Shklyar D. R., Shprits Y. Y., Welling D. T., Zelenyi L. M.

- Circulation of heavy ions and their dynamical effects in the magnetosphere: recent observations and models // *Space Sci. Rev.* — 2014. — **184**, N 1. — P. 173–235.
27. Lopez R. E. Magnetospheric substorms // *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* — 1990. — **11**. — P. 264–271.
 28. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* — 2002. — **64**, N 2. — P. 125–143.
 29. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // *Space Sci. Rev.* — 2004. — **113**, N 1–2. — P. 127–206.
 30. Lui A. T. Y., Zheng Y., Zhang Y., Livi S., Rème H., Dunlop M. W., Gustafsson G., Mende S. B., Mouikis C., Kistler L. M. Cluster observation of plasma flow reversal in the magnetotail during a substorm // *Ann. Geophys.* — 2006. — **24**, N 7. — P. 2005–2013.
 31. Paschmann G., Daly P. W. Spectral analysis, reprinted from analysis methods for multi-spacecraft data // *ISSI Scientific Report SR-001* (Electronic edition 1.1). — 2000. — 491 p.
 32. Prokhorenkov A., Kozak L. V., Lui A. T. Y., Gala I. Diffusion processes in the transition layer of the Earth's magnetosphere // *Adv. Astron. Sp. Phys.* — 2015. — **5**, N 2. — P. 99–103.
 33. Rae I. J., Mann I. R., Angelopoulos V., Murphy K. R., Milling D. K., Kale A., Frey H. U., Rostoker G., Russell C. T., Watt C. E. J., Engebretson M. J., Moldwin M. B., Mende S. B., Singer H. J., Donovan E. F. Near-Earth initiation of a terrestrial substorm // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2009. — **114**, N 7. — P. 2156–2202.
 34. Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z. Multipoint observations of dipolarization front formation by magnetotail reconnection // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2012. — **117**, N A5. — P. 2156–2202.
 35. Savin S., Amata E., Zelenyi L., Lutsenko V., Safrankova J., Nemecek Z., Borodkova N., Buechner J., Daly P. W., Kronberg E. A., Blecki J., Budaev V., Kozak L., Skalsky A., Lezhen L. Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics // *Ann. Geophys.* — 2012. — **30**, N 1. — P. 1–7.
 36. Savin S., Budaev V., Zelenyi L., Amata E., Sibeck D., Lutsenko V., Borodkova N., Zhang H., Angelopoulos V., Safrankova J., Nemecek Z., Blecki J., Buechner J., Kozak L., Romanov S., Skalsky A., Krasnoselsky V. Anomalous interaction of a plasma flow with the boundary layers of a geomagnetic trap // *JETP Lett.* — 2011. — **93**, N 12. — P. 754–762.
 37. She Z.-S., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // *Phys. Rev. Lett.* — 1994. — **72**, N 3. — P. 336–339.
 38. THOR Exploring plasma energization in space turbulence. — Assessment Study Report ESA/SRE. — 2017. — 109 p.
 39. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 1998. — **79**, N 1. — P. 61–78.
 40. Treumann R. A., Brostrom L., LaBelle J., Sckopke N. The plasma wave signature of a “magnetic hole” in the vicinity of the magnetopause // *J. Geophys. Res.* — 1990. — **95**, N A11. — P. 19099–19144.

Стаття надійшла до редакції 24.01.18

REFERENCES

1. Barenblatt G. I. Turbulent boundary layers at very high Reynolds numbers. *Progress Math. Sci.* **59** (1), 45–62 (2004), [In Russian].
2. Kozak L. V. Methods and approaches for determination of turbulent environment characteristics. *Space Science and Technology*, **22** (99), 60–77 (2016).
3. Kozak L. V., Pilipenko V. A., Chugunova O. M., Kozak P. N. Statistical analysis of the turbulence of a forshock region and earth's magnetosheet. *Cosmic Research*, **49** (3), 202–212 (2011).
4. Kozak L. V., Savin S. P., Budaev V. P., Pilipenko V. A., Lezhen L. A Character of turbulence in the boundary regions of the Earth's magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **52** (4), 445–455 (2012).
5. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *USSR Academy Report*, **30** (4), 299–303 (1941).
6. Cosmic geoheliophysics / Eds L. M. Zelenyi, I. S. Veselovskiy. 624 p. (Physmatlit, Moscow, 2008). **1**.
7. Nishida A. Geomagnetic diagnose of the magnetosphere. *Mir (Moscow)*, 300 P. (1980).
8. Frick P. G. The turbulence: models and approaches. *Penn's State Tech. Univ. Part II*, 139 P. (1999).
9. Frish U. The turbulence: the heritage of A. N. Kolmogorov. *Phasic (Moscow)*, 343 P. (1998).
10. Biskamp D., Schwarz E., Drake J. F. two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1264–1272 (1996).
11. Benzi R., Ciliberto S., Tripiccion R., Baudet C., Massaioli F., Succi S. Extended self-similarity in turbulent flows. *Phys. Rev. E* **48** (1), 29–32 (1993).
12. Chechkin A. V., Gonchar V. Y., Gorenflo R., Korabel N., Sokolov I. M. Generalized fractional diffusion equations for accelerating subdiffusion and truncated Levy flights. *Phys. Rev. E. Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* **78** (2), 290–302 (2008).
13. Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., Zimbardo G., Macek W. M. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* **110** (A7), 1–12 (2005).
14. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-poisson statistics and generalized scale covariance. *Phys. Rev. Lett.* **73** (7), 959–962 (1994)

15. Farge M. Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **24** (1), 395—458 (1992).
16. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.* **11** (5/6), 561—566 (2004).
17. Hadid L.Z., Sahraoui F., Kiyani K. H., Retinò A., Modo-
lo R., Canu P., Masters A., Dougherty M. K. Nature of the MHD and Kinetic Scale Turbulence in the Magneto-
sheath of Saturn: Cassini Observations. *Astrophys. J.* **813** (2) 29 p. (2015).
18. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Eds
Kamide Y., Chian A. *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin
Heidelberg.* 539 P. (2007).
19. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Influence of the
Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation
(ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet
approach. *J. Geophys. Res. Atmos.* **108** (D21), 4677—4708
(2003).
20. Kiyani K. H., Chapman S. C., Khotyaintsev Y. V., Dun-
lop M. W., Sahraoui F. Global Scale-Invariant Dissipa-
tion in Collisionless Plasma Turbulence. *Phys. Rev. Lett.*
103 (7), 75006 (4 p.) (2009).
21. Kiyani K. H., Chapman S. C., Sahraoui F., Hnat B., Fau-
varque O., Khotyaintsev Y. V. Enhanced magnetic com-
pressibility and isotropic scale invariance at sub-ion Lar-
mor scales in solar wind turbulence. *Astrophys. J.* **763** (1),
10 p. (2013).
22. Kozak L. V., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Prokhorenkov A. S.
Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster
mission measurements. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*
154, 115—126 (2017).
23. Kozak L. V., Prokhorenkov A. S., Savin S. P. Statistical
analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of
Earth's magnetosphere. *Adv. Sp. Res.* **56**(10), 2091—2096
(2015).
24. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at
very high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* **5**, 497—543
(1959).
25. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions.
J. Fluid Mech. **41**(1), 189—217 (1970).
26. Kronberg E. A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I., Delcourt
D. C., Grigorenko E. E., Kistler L. M., Kuzichev I. V., Liao J.,
Maggiolo R., Malova H. V., Orlova K. G., Perroomian V.,
Shklyar D. R., Shprits Y. Y., Welling D. T., Zelenyi L. M.
Circulation of Heavy Ions and Their Dynamical Effects in
the Magnetosphere: Recent Observations and Models. *Space
Sci. Rev.* **184**(1), 173—235 (2014).
27. Lopez R. E. Magnetospheric substorms. *Johns Hopkins
APL Tech. Dig.* **11**, 264—271 (1990).
28. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth
magnetosphere. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* **64** (2),
125—143 (2002).
29. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm ex-
pansion onsets. *Space Sci. Rev.* **113** (1), 127—206 (2004).
30. Lui A. T. Y., Zheng Y., Zhang Y., Livi S., Rème H., Dun-
lop M. W., Gustafsson G., Mende S. B., Mouikis C., Kis-
tler L. M. Cluster observation of plasma flow reversal in
the magnetotail during a substorm. *Ann. Geophys.* **24** (7),
2005—2013 (2006).
31. Paschmann G., Daly P. W. Spectral Analysis, Reprinted
from Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. *ISSI
Scientific Report SR-001 (Electronic edition 1.1).* 491 p.
(2000).
32. Prokhorenkov A., Kozak L. V., Lui A. T. Y., Gala I. Dif-
fusion processes in the transition layer of the Earth's mag-
netosphere. *Adv. Astron. Sp. Phys.* **5**(2), 99—103 (2015).
33. Rae I. J., Mann I. R., Angelopoulos V., Murphy K. R.,
Milling D. K., Kale A., Frey H. U., Rostoker G., Russell
C. T., Watt C. E. J., Engebretson M. J., Moldwin M. B.,
Mende S. B., Singer H. J., Donovan E. F. Near-Earth
initiation of a terrestrial substorm. *J. Geophys. Res. Sp.
Phys.* **114** (7), 2156—2202 (2009).
34. Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z. Multipoint ob-
servations of dipolarization front formation by magneto-
tail reconnection. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* **117** (A5),
2156—2202 (2012).
35. Savin S., Amata E., Zelenyi L., Lutsenko V., Safrankova
J., Nemecek Z., Borodkova N., Buechner J., Daly P. W.,
Kronberg E. A., Blecki J., Budaev V., Kozak L., Skalsky
A., Lezhen L. Super fast plasma streams as drivers of tran-
sient and anomalous magnetospheric dynamics. *Ann.
Geophys.* **30** (1), 1—7 (2012).
36. Savin S., Budaev V., Zelenyi L., Amata E., Sibeck D.,
Lutsenko V., Borodkova N., Zhang H., Angelopoulos V.,
Safrankova J., Nemecek Z., Blecki J., Buechner J., Kozak L.,
Romanov S., Skalsky A., Krasnoselsky V. Anomalous in-
teraction of a plasma flow with the boundary layers of a
geomagnetic trap. *JETP Lett.* **93** (12), 754—762 (2011).
37. She Z.-S., Leveque E. Universal scaling laws in fully
developed turbulence. *Phys. Rev. Lett.* **72** (3), 336—339
(1994).
38. THOR Exploring plasma energization in space turbu-
lence. *Assessment Study Report ESA/SRE.* 109 p. (2017).
39. Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet
Analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** (1), 61—78 (1998).
40. Treumann R. A., Brostrom L., LaBelle J., Skopke N.
The plasma wave signature of a “magnetic hole” in the
vicinity of the magnetopause. *J. Geophys. Res.* **95** (A11),
19099—19144 (1990).

Received 24.01.18

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, Е. Кронберг³,
А. Прохоренков¹, Е. Григоренко⁴, О. Черемных²,
С. Черемных², Е. Луї⁵, П. Козак¹, І. Кунделько¹

¹ Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

² Институт космических исследований Национальной
академии наук Украины и Государственного
космического агентства Украины, Киев, Украина

³ Институт Макса Планка, Геттинген, Федеративная
Республика Германия

⁴ Институт космических исследований Российской
академии наук, Российская Федерация

⁵ Университет имени Джона Хопкинса, Балтимор, США

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Рассмотрены свойства турбулентных процессов в хвосте магнитосферы Земли по измерениям трех космических аппаратов миссии «Кластер-2» для 17 октября 2005 г. (данные представлены с временной дискретностью 22.5 Гц). Для определения параметров турбулентных процессов был проведен анализ моментов функции распределения флуктуаций магнитного поля на разных масштабах, а также спектральный и вейвлет-анализ. Полученные зависимости сравнивались с известными на сегодняшний момент моделями для описания как однородных, так и неоднородных турбулентных процессов. Отмечаются существенные вариации спектрального индекса: для момента до инициирования суббури спектральный индекс соответствует модели Колмогорова, а во время суббури он близок к индексу электрон-магнито-гидродинамической турбулентности. Вейвлет-анализ показал наличие как прямых, так и обратных каскадных процессов, а также наличие РС-пульсаций.

Ключевые слова: турбулентные процессы, хвост магнитосферы Земли, модели развития суббури, РС-пульсации, спектры турбулентности в хвосте магнитосферы Земли.

L. Kozak^{1,2}, B. Petrenko¹, E. Kronberg³, A. Porokhorenkov¹,
E. Grigorenko⁴, O. Cheremnyh², S. Cheremnyh², A. Lui⁵,
P. Kozak¹, I. Kundelko¹

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

² Space Research Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine and the State Space Agency
of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Max Planck Institute, Getttingen, Germany

⁴ Space Research Institute of the Russian Academy
of Sciences, Russian Federation

⁵ John Hopkins University, Baltimore, USA

TURBULENT PROCESSES IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL: STATISTICAL AND SPECTRAL ANALYSIS

Investigation of processes in the tail of Earth's magnetosphere is substantially complicated by the presence of

turbulence. Development of the instabilities results to a "catastrophic" reorganization of the flow and structure of the magnetic field. Complex turbulent processes observed in the Earth's magnetosphere cannot be described within the framework of analytical models of the MHD flows. To study the properties of the turbulence on large temporal and spatial scales one has to involve the methods of statistical physics and cascade models developed in hydrodynamic theories. At the same time, from an experiment it is possible to determine the statistical properties of the turbulence associated with the scale invariance. This approach allows us to obtain a comprehension about physical properties of plasma turbulence and to describe qualitatively and quantitatively the processes of transport in the turbulent regions. In the course of the work we analyzed the properties of the small-scale developed turbulence in the tail of Earth's magnetosphere by measurements of the flux-gate magnetometer on-board of the 3 spacecrafts of the "Cluster-2" mission with a sampling frequency of 22.5 Hz for October 17, 2005. To achieve this goal we used the fractal and multifractal research methods that we supplemented with spectral and wavelet analysis. In particular, we carried out the following methods: analysis of the wings of the PDF of the magnetic field fluctuations (fractal consideration); analysis of the expanded self-similarity (ESS-analysis, multifractal consideration); analysis of the power spectral density (spectral studies); amplitude analysis and wavelet power spectral analysis of the signal (wavelet analysis). As a result of the analysis we can conclude that the distribution of magnetic field fluctuations during the sub-storm indicates non-Gaussian statistics of the process as well as on the excess of large-scale perturbations generated by the source. When comparing the structure functions of the magnetic field fluctuations during the initiation of the sub-storm with the Kolmogorov, Kraichnan and three-dimensional isotropic log-Poisson model with the She and Leveque parameters we have found that these turbulent processes cannot be described by isotropic homogeneous models and, in addition, they are characterized by the presence of super-diffusion. There is a significant difference between the spectral indices for the moments before and during the initiation of the sub-storm: before the initiation of the sub-storm the spectral index is close to the Kolmogorov model, and during the initiation it is close to the electron-magneto-hydrodynamic turbulence. The wavelet analysis showed the presence of both direct and inverse cascade processes, as well as the presence of PC pulsations.

Keywords: turbulent processes, tail of the Earth's magnetosphere, substorm development models, Pc pulsations, turbulence spectra in the tail of the Earth's magnetosphere.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.069>

УДК 629.7.05

А. И. Ткаченко

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, Украина

ДВА АЛГОРИТМА ПРИВЯЗКИ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Рассматриваются два принципиально различных алгоритма координатной привязки наземных объектов по космическим снимкам. Привязка включает полетный этап — съемку объектов привязки с орбиты — и наземный этап — обработку снимков, переданных на землю вместе с синхронно полученными показаниями звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Считается, что предполагаемое местонахождение объекта привязки известно с точностью порядка 1...2 км или сотен метров. Это позволяет наводить оптическую ось камеры на окрестность объекта привязки так, чтобы обеспечить захват этого объекта полем зрения камеры и привязку с точностью порядка десятков метров. В отличие от других алгоритмов, представленные здесь алгоритмы координатной привязки не предусматривают использования эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, и следовательно, свободны от неудобств, связанными с возможными локальными неточностями такой аппроксимации..

Ключевые слова: космический аппарат, координатная привязка, звездный датчик, камера, объект привязки.

Координатная привязка неизвестного точечного наземного объекта (объекта привязки) рассматривается здесь как определение координат этого объекта в базисе, связанном с Землей, по результатам съемки с борта космического аппарата (КА) с привлечением показаний бортового звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Искомые координаты объекта привязки рассчитываются путем обработки первичной информации, включающей изображение объекта на снимке, с помощью соответствующих алгоритмов [2, 4, 5]. Привязка включает полетный этап — съемку объектов привязки с орбиты — и наземный этап — обработку снимков, переданных на землю вместе с синхронно полученными показани-

ями звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS. Конкретнее, считаем, что предполагаемое местонахождение объекта привязки известно с точностью порядка 1...2 км или сотен метров. Это позволяет наводить оптическую ось камеры на окрестность объекта привязки так, чтобы обеспечить захват этого объекта полем зрения камеры и привязку с точностью порядка десятков метров.

Цель настоящей работы — обоснование и сравнительное исследование двух алгоритмов решения охарактеризованной выше задачи координатной привязки, существенно различных по принципам построения и структуре. Надлежит также определить тактику съемок и обработки снимков при реализации этих алгоритмов.

© А. И. ТКАЧЕНКО, 2018

Пусть объект привязки M в момент его съемки камерой низкоорбитального КА находится на трассе полета или вблизи нее. Синхронно с моментами экспонирования t_i поступает информация от звездного датчика и GPS. Введем ортонормированные координатные базисы: базис K , связанный с камерой, с началом в ее центре проекции — точке O ; базис E , связанный со звездным датчиком, условно с тем же началом; базис J , геоцентрический, произвольным образом связанный с Землей. Представления трехмерных векторов в каком-либо из базисов отмечаем соответствующими нижними индексами. Символом вида C_{QP} обозначается матрица преобразования вектора из ортонормированного базиса P в ортонормированный базис Q . Таким образом, $C_{JK} = C_{JE}C_{EK}$. Матрица C_{EK} оценивается и уточняется с помощью процедуры полетной геометрической калибровки, описанной, например, в нашей работе [6]. Матрица C_{JE} рассчитывается по показаниям звездного датчика и бортового хронометра. Представление геоцентрического радиуса-вектора точки M в базисе J обозначим $r_J = \text{const}$; O_i — положение точки O в момент t_i ; R_{iJ} — геоцентрический радиус-вектор точки O_i , найденный с помощью GPS. Направление MO_i воспроизводится путем нахождения соответствующего единичного вектора e_K по снимку, выполненному в момент t_i , и преобразования

$$e_{iJ} = C_{JK}e_{iK}. \quad (1)$$

Необходимо составить алгоритм преобразования показаний перечисленной выше аппаратуры в оценку координат вектора r_J с точностью порядка десятков метров.

Фотограмметрическое условие коллинеарности [3] в рассматриваемой ситуации означает, что векторы e_{iJ} и $r_J - R_{iJ}$ коллинеарны. Отсюда

$$e_{iJ} \times r_J = e_{iJ} \times r_J R_{iJ}. \quad (2)$$

Это уравнение измерений метода координатной привязки, основанного на фотограмметрическом условии коллинеарности. Формально это трансформация алгоритма координатной привязки из [5]. Само по себе отдельное уравне-

ние (2) дает возможность оценить r_J с точностью до составляющей, коллинеарной e_{iJ} . Решение системы не менее чем двух уравнений (2), полученной из последовательности снимков с неколлинеарными векторами e_{iJ} , может обеспечить приемлемую точность оценивания координат объекта привязки.

Используем представление $e_{iJ} = [e_1, e_2, e_3]^T$ (индекс T — символ транспонирования). В условной ситуации, когда базисы K и J совмещены или близки, координата e_3 вектора e_i близка к проекции этого вектора на оптическую ось камеры. По окончании полетной геометрической калибровки вместо вектора e_{iJ} доступна и учитывается в (2) его аппроксимация $e'_{iJ} \approx e_u + \delta e_u$, где $\delta e_u \approx \theta_u \times e_u$; $\theta_u = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in R^3$ — векторная остаточная ошибка калибровки [6].

Пусть O° — точка пересечения оптической оси камеры с земной поверхностью. Если объект привязки в момент экспонирования находится вблизи точки O° , то

$$|e_1| \ll 1, |e_2| \ll 1, e_3 \approx 1. \quad (3)$$

При этом чем больше расстояние между точками M и O° , тем больше $|e_1|$ и $|e_2|$. Ошибка в правой части уравнения (2), порожденная неточной калибровкой, оценивается выражением

$$\begin{aligned} \delta e_{iJ} \times R_{iJ} &\approx [e_1(\theta_2 R_2 + \theta_3 R_3) - \theta_1(e_2 R_2 + R_3), \\ e_2(\theta_1 R_1 + \theta_3 R_3) - \theta_2(e_1 R_1 + R_3), \\ \theta_1 R_1 + \theta_2 R_2 - \theta_3(e_1 R_1 + e_2 R_2)]^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условий (3) следует, что ошибка (4) практически не зависит от θ_3 , если точка M достаточно близка к O° . Подобный факт отмечен в работе [5]. С увеличением расстояния между точками M и O° неблагоприятное влияние параметра θ_3 на ошибку (4) усиливается. Из (2) видно также, что условия съемки конкретного объекта тем благоприятнее для точности его координатной привязки, чем больше угол между первой и последней линиями визирования.

При реализации рассмотренного алгоритма координатной привязки каждому снимку конкретного объекта соответствует одно уравнение

(2). В отличие от этого, в представленном далее алгоритме, использующем одно из правил решения треугольников, снимки объекта привязки обрабатываются попарно, и из каждой пары снимков получаются две оценки вектора $\mathbf{r}_J$. Данные, используемые при реализации этого алгоритма, схематически показаны на рисунке, где O_i, O_k — положения точки O в последовательные моменты экспонирования t_i и t_k ; $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_k$ — соответственно единичные векторы направлений MO_i и MO_k ; $\mathbf{n}$ — единичный вектор прямой O_iO_k ; O_E — центр Земли; $\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_k$ — геоцентрические радиусы-векторы точек O_i и O_k ; α_i, α_k — углы между прямыми MO_i и O_iO_k ; α_k — угол между прямыми MO_k и O_iO_k ; β — угол между прямыми MO_i и MO_k ; $\mathbf{r}$ — искомый геоцентрический радиус-вектор точки M . Обозначения, не выведенные на рисунке: b — доступная вычислению длина отрезка O_iO_k ; p_i, p_k — неизвестные длины отрезков MO_i и MO_k .

Выполним вычисления:

$$\cos \alpha_i = \mathbf{n}_J^T \mathbf{e}_{iJ}, \quad \cos \alpha_k = \mathbf{n}_J^T \mathbf{e}_{kJ}, \quad \cos \beta = \mathbf{e}_{iJ}^T \mathbf{e}_{kJ}.$$

Перейдя от найденных косинусов к положительным значениям синусов тех же углов, на основании теоремы синусов [1] найдем из треугольника MO_iO_k :

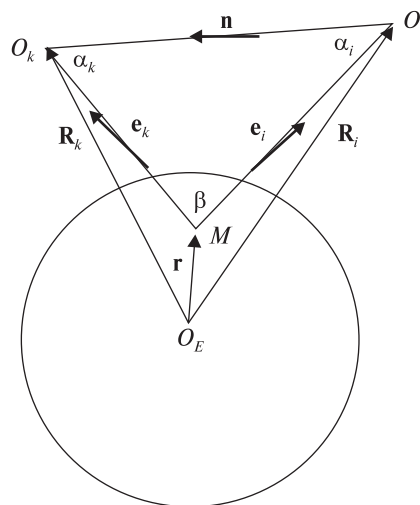
$$p_i = b \sin \alpha_k / \sin \beta, \quad p_k = b \sin \alpha_i / \sin \beta.$$

В соответствии с рисунком оценки вектора $\mathbf{r}_J$ получаются в виде

$$\mathbf{r}_J = \mathbf{R}_{iJ} - p_i \mathbf{e}_{iJ}, \quad \mathbf{r}_J = \mathbf{R}_{kJ} - p_k \mathbf{e}_{kJ}. \quad (5)$$

Результирующая оценка вектора $\mathbf{r}_J$ находится путем усреднения всех доступных оценок (5). С точки зрения точности привязки желательно при реализации формул (5) компоновать все пары снимков так, чтобы каждый угол β был достаточно велик.

Искажения положений модельных (вычисленных) векторов $\mathbf{e}_{iJ}, \mathbf{e}_{kJ}$ относительно $\mathbf{n}_J$, порожденные влиянием остаточной ошибки полетной калибровки θ_3 в преобразованиях вида (1), незначительны, если в моменты экспонирования t_i и t_k объект привязки достаточно близок к точке O° . Напротив, если хотя бы в один из этих моментов объект привязки удален от O° , и соответствующая линия визирования заметно отклонена от оптической оси камеры, упомянутые



К выводу формул (5)

искажения оказываются довольно существенными. Поэтому высказанные выше соображения о влиянии параметра θ_3 на точность координатной привязки по формулам (2) справедливы и для алгоритма (5).

Моделирование алгоритмов (2), (5) выполнялось по аналогии с тем, как это сделано в работах [5, 6]. Воспроизводилось движение КА по околокруговой солнечно-синхронной орбите высотой 670 км. Один из базисных векторов базиса $\mathbf{J}$ был направлен по оси вращения Земли, два других находились в плоскости экватора. При $\theta_i = 0$ базисы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{K}$ совмещены. Моделирование реализовалось как серия вариантов счета, в которой для формирования всех случайных величин использовался генератор последовательности псевдослучайных чисел. Задавалось размещение «неизвестных» точечных наземных объектов на участках А и В, имеющих форму квадрата со стороной соответственно 10 и 20 км и лежащих на трассе полета КА. Съемка каждого участка производилась, когда он оказывался в поле зрения камеры. На каждом из участков А и В 16 объектов привязки находятся в узлах равномерной квадратной сетки со стороной ячейки соответственно 3.3 или 6.7 км.

Таким образом, каждая из координат объектов одного участка в земном базисе образует (4×4) -матрицу. Объекты пронумерованы, как принято в языке программирования «Фортран»: сверху вниз в каждом столбце упомянутой

матрицы с непрерывным продолжением нумерации в следующем столбце. Такая конфигурация удобна для демонстрации зависимости ошибок координатной привязки от расположения объектов привязки относительно точки O° . При съемках ось чувствительности камеры наводилась на объект № 7 соответствующего участка, находящийся на пересечении второго столбца и третьей строки матрицы. Ошибки звездного датчика вводились как нормально распределенные случайные углы поворотов вокруг двух направлений, перпендикулярных к оптической оси датчика, и вокруг самой этой оси со средними квадратичными отклонениями соответственно

Таблица 1. Ошибки координатной привязки по формулам (5)

Ошибка	Участок А				Участок В			
$\sigma_x, \text{ м}$	20.3	19.3	17.9	17.3	40.4	35.9	27.3	23.2
	18.2	17.4	16.3	16.0	29.6	25.2	17.3	14.3
	15.5	15.1	15.0	15.2	11.4	10.1	13.7	17.4
	15.0	14.9	15.3	15.9	12.0	14.9	22.7	27.2
$\sigma_y, \text{ м}$	13.7	11.9	15.6	19.8	14.9	16.2	19.5	21.9
	13.1	11.6	16.1	20.6	14.6	15.5	18.5	20.8
	12.1	11.5	17.2	21.9	15.1	15.0	17.1	18.9
	12.0	11.6	17.9	22.6	15.4	15.1	16.3	17.8
$\sigma_z, \text{ м}$	16.6	18.0	21.0	22.4	10.8	16.2	35.2	45.7
	13.2	14.2	16.9	18.3	10.6	12.8	30.9	41.3
	11.7	11.3	11.6	12.1	15.4	9.9	22.7	32.9
	14.1	13.0	11.8	11.8	19.1	11.5	19.0	28.7

Таблица 2. Координатная привязка с датчиком БОКЗ-МД-02

Ошибка	Участок А				Участок В			
$\sigma_x, \text{ м}$	13.3	12.0	10.0	9.0	39.4	34.7	25.9	21.6
	10.3	9.3	7.4	6.9	28.3	23.7	15.2	11.7
	6.1	5.5	5.9	6.6	8.0	6.2	11.3	15.7
	5.6	5.9	7.5	8.5	9.0	12.7	21.5	26.2
$\sigma_y, \text{ м}$	12.9	10.0	12.5	16.9	5.5	7.6	13.1	16.2
	12.1	9.5	13.0	17.7	4.8	6.1	11.6	14.6
	10.9	9.1	14.2	19.1	5.8	4.8	8.6	11.5
	10.7	9.1	15.0	19.8	6.7	4.8	7.3	10.1
$\sigma_z, \text{ м}$	13.7	15.4	18.9	20.5	9.4	15.1	34.6	45.1
	9.1	10.6	14.0	15.7	9.3	11.5	30.2	40.8
	5.5	4.9	5.8	6.8	14.7	8.4	21.9	32.3
	9.1	7.6	5.6	5.4	18.6	10.4	18.1	28.0

5", 5" и 12". Это уровень точности прибора БОКЗ-М60 при угловых скоростях рассматриваемого КА, характерных для режима наведения оптической оси камеры на неподвижный наземный объект [http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php]. Размер пиксела камеры 9 мкм. Среднее квадратичное отклонение нормально распределенных случайных ошибок GPS равно 3 м [<http://izvestia.ru/news/585537>]. Имитации процесса координатной привязки предшествовала полетная калибровка системы «камера и звездный датчик», после которой средние квадратичные отклонения остаточных ошибок $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ составляли соответственно 2.7", 3.1" и 54.6".

Реализация алгоритма (2) выполнялась с использованием двенадцати снимков каждого из участков А и В с интервалом 7 с между последовательными снимками. В процессе съемок тангаж КА изменялся от 25° при первом экспонировании до -25° при последнем. При вычислениях по формулам (5) двенадцать таких же снимков использовались попарно: каждый снимок с номером из диапазона $i = 4, \dots, 12$ сочетался поочередно с одним из снимков с номерами $k = 1, \dots, i - 3$.

По результатам 100 вариантов моделирования формировались характеристики $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — оценки средних квадратичных отклонений ошибок вычисления координат объектов в земном базисе **Ж**. В табл. 1 представлены такие характеристики, полученные при моделировании алгоритма (5). В двух последних графах этой таблицы («Участок А» и «Участок В») представлены в матричной форме характеристики, названные в соответствующей ячейке первой графы. Видно, как с увеличением расстояния от точки O° до объекта привязки снижается точность оценивания координат объекта. Близкие по численным значениям результаты получены при моделировании алгоритма (2).

Есть основания считать, что ограниченная точность координатной привязки, показанная в табл. 1, происходит от недостаточной точности полетной калибровки, прежде всего из-за ошибок звездного датчика. С повышением точности калибровки в результате усреднения ошибок звездного датчика вследствие увеличения числа

снимков, привлекаемых для калибровки, увеличивалась и точность координатной привязки.

Другой способ повышения точности полетной калибровки — использование более совершенных звездных датчиков. Результаты, представленные в табл. 2, получены в таких же условиях, как табл. 1, с тем отличием, что имитировались показания звездного датчика со средними квадратичными отклонениями ошибок 1", 1" и 20". Это предполагаемая точность звездного датчика БОКЗ-МД-02, который на момент публикации сведений из [http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php] находился на стадии макетирования. Заметно существенное повышение точности координатной привязки по сравнению с табл. 1 по крайней мере для объектов, близких к узлу № 7 (точке 0°). Сокращение комплекта снимков, использованных при координатной привязке, до шести не вызвало существенного снижения точности привязки по сравнению с результатами из табл. 1 и 2.

В отличие от [2, 4], представленные здесь алгоритмы координатной привязки не предусматривают использования эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, и следовательно, свободны от неудобств, связанными с возможными локальными неточностями такой аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронштейн И. Н., Семедьяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — Изд. десятое, стереотипное. — М.: Наука, 1964. — 608 с.
2. Лебедев Д. В. О привязке космических снимков по орбитальным данным // Пробл. упр. и информатики. — 2016. — № 6. — С. 120—132.
3. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. — М.: Недра, 1984. — 552 с.
4. Пятак И. А. Задачи координатной привязки снимков, выполненных КА // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2011. — Вип. 14. — С. 116—122.
5. Ткаченко А. И. О координатной привязке наземных объектов по космическим снимкам // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 2. — С. 65—72.
6. Ткаченко А. И. Алгоритмы согласования ориентации звездного датчика и камеры космического аппарата // Пробл. упр. и информатики. — 2015. — № 3. — С. 116—126.

Стаття надійшла до редакції 25.12.17

REFERENCES

1. Bronshtejn I. N., Semendjaev K. A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja VTUZov. — Izd. desjatoe, stereotipnoe. 608 s. (Nauka, M., 1964).
2. Lebedev D. V. On the coordinate determination of space images by orbital data. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 6, 120—132 (2016) [in Russian].
3. Lobanov A. N. Fotogrammetrija. 552 s. (Nedra, M., 1984).
4. Pjatak I. A. Zadachi koordinatnoj privjazki snimkov, vypolnennyh KA. *Visnik Dnipropetrovs'kogo un-tu. Ser. Raketno-kosmichna tehnika*, vip. 14, 116—122 (2011).
5. Tkachenko A. I. On a geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. *Kosm. nauka tehnol.*, 21 (5), 65—72 (2015) [in Russian].
6. Tkachenko A. I. Algorithms of the attitude matching of star tracker and camera of the spacecraft. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 3, 115—136 (2015) [in Russian].

Received 25.12.17

О. І. Ткаченко

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України
і Міністерства освіти і науки України,
Київ, Україна

ДВА АЛГОРИТМИ ПРИВ'ЯЗКИ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ

Задача координатної прив'язки невідомих наземних об'єктів становить важливу частину дистанційного зондування Землі. Для розв'язання згаданої задачі з використанням бортової оптико-електронної системи низькоорбітального космічного апарата мають бути розроблені спеціальні схеми зйомки і обчислювальні алгоритми. Основна мета даної статті — запропонувати і дослідити такі нові алгоритми. Розглядаються два принципово відмінних алгоритми координатної прив'язки наземних об'єктів з використанням космічних знімків. Перший з цих алгоритмів ґрунтується на фотограмметричній умові колінеарності. Другий алгоритм спирається на правила розв'язання трикутників. Координатна прив'язка включає польотний етап — зйомку об'єктів з орбіти — і наземний етап — обробку знімків, переданих на землю разом із синхронно отриманими показами зоряного давача і обладнання споживача GPS. Припускається, що попередньо задане розташування об'єкта координатної прив'язки відоме з точністю порядку 1...2 км або сотень

метрів. Це дозволяє спрямувати оптичну вісь камери на окіл об'єкта координатної прив'язки таким чином, щоб забезпечити захоплення цього об'єкта полем зору камери і гарантувати координатну прив'язку з точністю порядку десятків метрів. На відміну від інших алгоритмів такого призначення, розглядуваний підхід не передбачає використання еліпсоїда, який апроксимує форму Землі, і, отже, запропоновані алгоритми вільні від непевностей, пов'язаних з можливими локальними неточностями згаданої апроксимації. Чисельне моделювання продемонструвало задовільну точність запропонованих алгоритмів координатної прив'язки у відповідності з попередньо вказаними вимогами. Можна зробити висновок, що запропоновані алгоритми можуть бути ефективно застосовані до координатної прив'язки наземних об'єктів з використанням космічних знімків.

Ключові слова: космічний апарат, координатна прив'язка, зоряний датчик, камера, об'єкт прив'язки.

A. I. Tkachenko

International Research and Training Center
for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

TWO ALGORITHMS FOR THE GEO-REFERENCING OF TERRESTRIAL OBJECTS USING SPACE SNAPSHOTS

The problem of the geo-referencing of unknown terrestrial objects with use of the space snapshots is an important part of remote sensing of the Earth. For resolving the above-

mentioned problem, the onboard optical-electronic system of the low-Earth spacecraft is used as well as special imaging schemes and calculation algorithms should be elaborated. The main purpose of this paper is to propose and to study such new algorithms. We consider two fundamentally different algorithms for the geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. The first of these algorithms is based on the photogrammetric condition of collinearity. The second one is leant upon the rules of triangles resolution. The geo-referencing includes the flight stage as the shooting of objects from the orbit and the ground stage as the processing of images transmitted to the ground altogether with the synchronously received indications of the star tracker and the equipment of GPS customer. It is believed that the preliminarily supposed location of the geo-referencing object is known with accuracy of the order of 1 ... 2 km or hundreds of meters. This allows us to direct the camera's optical axis to the vicinity of the geo-referencing object in such a way that to be ensured that this object is captured by the field of view of the camera and the geo-referencing has accuracy of the order of tens of meters. Unlike other algorithms, our approach does not require the use of an ellipsoid that approximates the shape of the Earth, and, consequently, the proposed algorithms are free of the inconvenience associated with possible local inaccuracies of such approximation. The numerical simulation had demonstrated a satisfactory accuracy of the proposed geo-referencing algorithms in accordance with the aforesaid demands. We conclude that the proposed algorithms may be effectively applied for the geo-referencing of terrestrial objects with use of space snapshots.

Keywords: spacecraft, geo-referencing, star tracker, camera, object of geo-referencing.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.075>

УДК 349.6

Н. Р. Малишева, А. М. Гурова, О. Є. Михайський

Інститут держави і права ім. В. М. Корещького Національної академії наук України, Київ, Україна

ЕКОЛОГО-ПРАВОВИЙ СТАТУС ЛЮДИНИ В КОСМОСІ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Збільшення кількості пілотованих космічних подорожей обумовлює необхідність розроблення належного еколого-правового підґрунтя життєзабезпечення людини в космосі. Зазначена сфера правового регулювання є досить широкою та диверсифікованою у різних космічних державах, тому потребує дослідження з метою виокремлення перспективних напрямків реєцепції кращого досвіду до національного законодавства України. Таким чином, метою цієї статті є дослідження всіх етапів життєзабезпечення пілотованих космічних місій за законодавством деяких провідних учасників ринку космічних послуг, а саме: Російської Федерації, Республіки Казахстан, США та ЄКА, задля врахування цього правового підґрунтя під час розробки відповідної сфери правового регулювання в Україні. Для досягнення мети цього дослідження були використані положення про життєзабезпечення людини в космосі п'яти договорів з космосу, Угоди про Міжнародну космічну станцію, національних правових актів, технічних регламентів, керівництв тощо. Під час дослідження використовувались методи аналізу, синтезу, порівняння, структурування тощо. В результаті весь обсяг аналізованого правового масиву забезпечення життєдіяльності людини під час виконання пілотованих космічних місій було структуровано: по-перше, відповідно до суб'єкта регулювання, — щодо вимог до осіб (медичних, санітарних тощо) та вимог, які ставляться до умов довкілля — щодо чинників космічного середовища (невагомість, радіація, освітлення тощо); по-друге, відповідно до етапів космічних місій: на вимоги до підготовки, процесу виконання космічних місій та реабілітації після них. Було визначено спільні та відмінні риси таких вимог за екологічним та іншим законодавством Російської Федерації, Республіки Казахстан, США та ЄКА. В результаті накреслено такі основні напрямки розвитку законодавства України у вказаній сфері: 1) встановлення медичних, фізичних, психологічних та інших критеріїв відбору для набуття статусу космонавта/астронавта; 2) визначення вимог до умов життєдіяльності та готовності до виконання завдань космічних місій; 3) система реабілітаційних процедур після виконання пілотованої космічної місії.

Ключові слова: міжнародне космічне право, національне законодавство, еколого-правовий статус, санітарно-гігієнічні норми, медичні вимоги, технічні нормативи.

Розвиток космічних технологій настільки розширив присутність людини у космосі, що наразі космічний простір вже розглядається не лише як об'єкт дослідження і використання, але і в контексті перспективного місця проживання. Здешевлення польотів у космос відкриває все більшість кількості людей можливості для космічного туризму, а розроблення технологій з видобування ресурсів космосу підвищує реалістичність ідей розгортання космічних колоній. Разом з тим ці процеси вимагають розроблення механізмів забезпечення життєдіяльності людини в нових умовах, зокрема засобами тієї га-

лузі права, ядром якої є відносини людини та навколишнього природного середовища, тобто нормами екологічного права.

На сьогодні норми, які уніфіковано регулюють діяльність космічних держав, зосереджені у п'яти міжнародних договорах ООН з космосу, в яких питання еколого-правового убезпечення перебування людини в космічному просторі зводяться лише до забезпечення взаємодопомоги під час поточної космічної діяльності, допомоги при аварії або вимушеній посадці, інформування про явища, які могли б нести небезпеку для життя та здоров'я, та відповідальності за завдання шкоди фізичним особам (ст. 5 та 6 Договору про принципи діяльності держав

© Н. Р. МАЛИШЕВА, А. М. ГУРОВА, О. Є. МИХАЙСЬКИЙ, 2018

щодо дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла) [2]. Ці та прийняті на їхній основі та на виконання норми пов'язані з регулюванням екстраординарних випадків діяльності людини в космосі, а не із забезпеченням її нормальної життєдіяльності. Більш прогресивними у цьому відношенні є норми Угоди про діяльність держав на Місяці та інших небесних тілах [10], зокрема закріплення в них зобов'язань держав передбачати всі можливі заходи для охорони життя та здоров'я осіб, що перебувають на Місяці, а також вживати заходів для запобігання порушенню сформованої рівноваги його середовища внаслідок внесення несприятливих змін у це середовище, його шкідливому забрудненню внаслідок доставки сторонніх для нього речовин, або якимось іншим чином. Разом з тим характерною особливістю регулятивної моделі цих норм є віднесення забезпечення еколого-правового статусу людини в космосі до юрисдикції космічних держав та їхніх об'єднань, таких як Європейське космічне агентство (ЄКА).

Космічне законодавство щодо еколого-правового статусу астронавтів / космонавтів характеризується значною розгалуженістю, що є наслідком комплексності регульованих суспільних відносин. За характером потреб життєзабезпечення людини формуються біологічні, санітарно-гігієнічні, медичні та інші вимоги, які в комплексі забезпечують екологічне благополуччя космонавтів/астронавтів. Крім цього, залучення їх до космічних місій включає стадії підготовки до польоту, перебування на борту космічних станцій, апаратів чи у відкритому космосі, проведення дослідів, повернення на Землю, а також реадаптацію до земних умов після тривалого польоту. Кожна з цих стадій обумовлює специфіку еколого-правового статусу людини. Окремими блоками екологічних прав астронавтів/космонавтів є також вимоги із забезпечення конфіденційності джерела походження отриманих внаслідок дослідів результатів, розслідування нещасних випадків, фінансування забезпечення їхніх екологічних прав на безпеку та сприятливі умови життєдіяльності.

Вимоги щодо еколого-правового забезпечення життєдіяльності людини в космосі можна об'єднати в єдиний масив за двома ознаками, які водночас є критеріями внутрішнього поділу у межах заданої ними сукупності відносин.

Перша ознака відображає предметну сферу нормативного впливу, яку умовно можна поділити на вимоги, що пред'являються до людей (медичні, санітарно-гігієнічні та інші) та вимоги, що пред'являються до середовища життєдіяльності в умовах впливу чинників космічного довкілля (невагомість, радіація, освітлення та інше).

Друга ознака впливає із супроводу еколого-правовими вимогами повного циклу пілотованого космічного польоту (від часу відбору до заgonу космонавтів/астронавтів до післяпольотної реабілітації).

Саме ці дві осі дозволяють вибудувати систему координат забезпечення еколого-правового статусу космонавтів/астронавтів. Оскільки детально висвітлити весь спектр вимог щодо еколого-правового забезпечення людини в космосі у межах однієї статті не вбачається можливим, зосередимо увагу на найбільш вагомим.

Первинною гарантією еколого-правового забезпечення перебування людини в космосі є проведення суворого відбору за такими мінімальними медичними, фізичними, психічними та освітніми показниками, які після їхнього розвитку ставали б інструментами виконання професійних обов'язків космонавта/астронавта. Водночас особи, чий рівень можливостей за вказаними показниками є нижчим за мінімальний, захищаються від деструктивних для них умов. Для прикладу, відповідно до положень наказу Роскосмосу «Адміністративний регламент Федерального космічного агентства з виконання державної функції із забезпечення відбору та підготовки космонавтів» від 11 жовтня 2010 р. № 156, кандидатом в космонавти Російської Федерації (РФ) може бути дієздатний, не судимий громадянин (-ка) РФ віком до 35 років, який пройшов відбір на відповідність фізичним (витривалість, сила, швидкість, спритність та ін.), психологічним, освітнім (визначається за результатами тестів, складених згідно з посібником для кандидатів у космонавти) та медичним вимогам (на підставі «Положення про медичний огляд і контроль за станом здоров'я кандидатів у космонавти, космонавтів і інструкторів-космонавтів» кандидати в космонавти проходять лабораторне, паразитологічне, антропометричне, інструментальне дослідження та ін.) [4]. Згідно з наказом Міністерства з інвестицій та розвитку Республіки Казахстан (РК) від 28.04.2015 № 493, кандидатами в космонавти можуть бути дієздатні меш-

канці РК від 18 до 40 років з вищою освітою, які пройшли медогляд та рішенням спеціальної Комісії допущені до відбору. Разом з тим, оскільки космонавти РК наразі мають доступ до космічного простору лише з використанням засобів РФ, цілком ймовірно, що верхній віковий діапазон казахських космонавтів також обмежується 35 роками, як це визначено в правилах РФ [3].

Аналогічні вимоги до астронавтів з усіх 22 держав-членів ЄКА представлено нормативними документами цієї міжнародної організації. Так, кандидати повинні бути у віковому діапазоні з 27 по 37 років, мати вищу освіту та не менш 3 років професійного досвіду, бути фізично та психічно здоровими, довести відсутність залежності від наркотиків, алкоголю, тютюну, наявність нормального діапазону руху та функціональності суглобів, гостроти зору обох очей 100 % природно або за допомогою коригування лінзами, продемонструвати якісні когнітивні, психічні та особистісні здібності [14], а також подати медичний сертифікат, виданий Європейським агентством з безпеки польотів (European Aviation Safety Agency) [12].

Медичний допуск до космічної діяльності в США регулюється авіаційним стандартом щодо медичної сертифікації НАСА ОСНМО 80771201MED, який визначає, що для отримання медичного сертифікату космічного польоту необхідно пройти щорічну експертизу, вимоги якої різняться залежно від виконуваних астронавтом завдань. Так, для пілота вимоги становлять I клас, для льотних інженерів — II, для інших членів команди — III. Примітно, що для осіб, які не є членами льотного екіпажу, але чия присутність пов'язана з космічною місією, не обов'язково отримувати відповідний сертифікат, достатньо дозволу на політ, що видається за результатами оцінки узагальненої медичної анкети місцевою клінікою. Додаткові обстеження серця та зору проводяться авіамедичним експертом НАСА, за результатами чого робиться висновок про наявність ризику для особи [18].

Аналогічну до відбору функцію життєзабезпечення містять вимоги щодо навчання кандидатів в космонавти/астронавти, яке передбачає щонайменше три етапи підготовки: базова, спеціалізована та командна — загальною тривалістю від чотирьох до шести років. Крім цього, майбутні члени Міжнародної

космічної станції (МКС) подорожують між навчальними центрами всіх п'яти організацій-партнерів МКС, вивчаючи їхні системи і модулі. Така діяльність спрямована на виконання ст. 11 Урядової угоди щодо співробітництва у межах МКС, яка передбачає, що кожен партнер має право направляти на справедливих умовах кваліфікований персонал для роботи в складі екіпажу космічної станції [9].

Найбільший блок еколого-правових вимог в зарубіжному законодавстві регулює забезпечення життєдіяльності космонавтів/астронавтів у межах пілотованих космічних апаратів та позакорабельної діяльності. Діяльність астронавтів ЄКА в основному зосереджується на виконанні завдань у межах належного ЄКА наукового модуля «Коламбус» (функціонує з 07.02.2008), а тому еколого-правові умови діяльності астронавтів ЄКА визначаються договорами щодо обслуговування МКС, зокрема такими, як Урядова угода щодо співробітництва в межах МКС, Кодекс поведінки членів екіпажу, Медичні операційні вимоги на МКС (International Space Station Medical Operations Requirements Documents (ISS MORD) та низкою інших. Крім цього, особливістю регламентації еколого-правового статусу астронавтів ЄКА є закріплення його в актах Європейської організації зі стандартизації в галузі космічної діяльності, яка була створена для розроблення узгодженого єдиного набору зручних стандартів для використання в усій європейській космічній діяльності. Членами даної організації є ЄКА в цілому, а також космічні агентства Італії (ASI), Великобританії (UK Space Agency), Франції (CNES), Німеччини (DLR), Нідерландів (NSO), Норвегії (Norwegian Space Centre); асоційованим членом є Канадське космічне агентство (CSA). Крім розгалуженої системи технічних стандартів, до документів вказаної організації належать: 1) довідники (Handbooks), які є результатом спільних зусиль Європейського космічного агентства, національних космічних агентств і європейських промислових асоціацій [11]; 2) матеріали для самостійного навчання (ECSS Self-Training material), які поділяються на два рівні: I рівень включає набір документів і способів їхнього застосування в космічних проектах, а II рівень охоплює технічні аспекти дисциплін на системному рівні [13]; 3) технічні меморандуми, які не є нормативними документами, але містять корисну ін-

формацію для спільноти розробників космічних систем з конкретної проблематики [20]. Доступ до всіх вказаних документів суворо обмежений авторськими правами. Європейське космічне агентство від імені її членів володіє авторськими правами на всі зазначені документи, тому жоден з них не може бути відтворений в будь-якій формі без згоди ЄКА або згоди членів цієї організації для їхнього власного використання, для їхніх підрядників і субпідрядників.

Разом з тим держави з найтривалішою історією пілотованих космічних місій мають власну розгалужену систему документів, присвячених формуванню еколого-правового статусу космонавтів /астронавтів в космосі. Так, в РФ таким документом є стандарт ДЕСТ Р 50804-95 «Навколишнє середовище космонавта в пілотованому космічному апараті. Загальні медико-технічні вимоги», який об'єднує більше 50 різноманітних стандартів, а у США — це стандарт NASA-STD-3001 «Стандарт космічних польотів в інтерфейсі «людина-система»» (Space Flight Human-System Standard), який складається з двох окремих томів: «Здоров'я команди» (Crew Health) та «Людські фактори, умови проживання та гігієна навколишнього середовища» (Human Factors, Habitability and Environmental Health).

Медичне забезпечення передбачає медичний контроль за станом здоров'я космонавта/астронавта на всіх етапах космічного польоту (забезпечується особисто, лікарями, які перебувають на борту, та тими, що супроводжують політ із Землі), медичну профілактику несприятливого впливу факторів космічного польоту і профілактику захворювань, медичну допомогу космонавту в разі невідкладних станів, захворювань, травми і в інших ситуаціях, що вимагають надання медичної допомоги [1].

До конкретних гарантій забезпечення комфортних життєвих умов астронавтів/космонавтів належать: 1) приватна комунікація з приводу здоров'я астронавта із медиками на Землі; 2) фармакологічні та терапевтичні контрзаходи, передбачені для зменшення небажаних фізичних, фізіологічних і психологічних ефектів космічного польоту для членів екіпажу; 3) контрзаходи, які враховують людські чинники гігієни, недоторканності приватного життя, харчування, робочого навантаження, спостереження Землі та проведення дозвілля; 4) приватні психологічні комунікації з двостороннім голосовим

та відеозв'язком раз на два тижні та щонайменше щотижня проведення сімейних комунікацій; 5) можливість оперативного повернення астронавта на Землю [16]. Примітно, що медичне обладнання та матеріали на борту МКС мають бути доступними для всіх членів екіпажу для можливості реагування на непередбачені медичні обставини. Крім того, всіма членами екіпажу МКС можуть бути використані і немедичні матеріали, незалежно від їхньої належності, якщо вони необхідні для підтримки життя в надзвичайних ситуаціях [15]. Вказана норма є втіленням засадничого положення про взаємодопомогу суб'єктів космічної діяльності, закріплену в договорах з космосу.

Окремо медичні та біоетичні вимоги встановлюються щодо безпечного проведення дослідів за участю людини. Зокрема, відповідно до стандарту НАСА NPD 7100.8E «Захист людини у процесі її дослідження» (Protection of Human Research Subjects) проведення дослідів повинно супроводжуватися дотриманням таких правил безпеки: 1) повідомлення осіб до початку їхнього відбору в астронавти про їхні права, включно з правом на відмову, та переконання в тому, що вони добровільно усвідомлюють свою участь як об'єкти наукових досліджень; 2) забезпечення астронавта правом відкликати згоду у будь-який час, в тому числі після того, як дослідження розпочалось; 3) проведення поглибленого інструктажу щодо всіх медико-біологічних експериментів, в тому числі супутніх й інтегрованих ризиків; 4) інформування астронавта про результати досліджень до публікації їх у відкритих джерелах [19].

Космічні держави в цілому типово підходять до організації роботи космонавтів/астронавтів задля підтримання їх у працездатному стані (не більше 8 год на добу, але з урахуванням біоритмічного типу активності), залежність обсягів проведення санітарно-гігієнічних процедур від тривалості перебування в космосі. Разом з тим встановлено й специфічні вимоги щодо забезпечення здорових умов життєдіяльності жінок. Для прикладу, стандартом щодо медичної сертифікації НАСА ОСНМО 80771201MED передбачено, що виявлення вагітності є умовою, що виключає виконання льотних обов'язків, починаючи з другого триместру вагітності (14—26 тижнів) [18].

Окремим блоком еколого-правових норм є технічні вимоги до проектування, підбору і застосування обладнання, яке утворює у межах пілотованого космічного апарата штучні, але наближені до природних умови життєдіяльності астронавтів/космонавтів, такі як атмосферне повітря, вода, освітлення, температурний режим, вологість, вентиляція, обмеження вібрації, шуму, радіації, електромагнітних та радіочастотних полів, лазерного, ультрафіолетового випромінювання, створення безпечного мікробіологічного середовища та інші. Щодо кожного з цих факторів встановлена шкала гранично допустимих норм впливу та правила й процедури їхнього утримання на безпечному для астронавтів/космонавтів рівні.

Специфічні вимоги щодо еколого-правового статусу астронавтів/космонавтів мають передбачатися також для одного з найбільш небезпечних фаз космічних польотів, для так званої «позакорабельної діяльності». З огляду на те, що під час виходу у відкритий космос астронавт/космонавт безпосередньо стикається з його агресивними умовами, досить суворі вимоги пред'являються до автономного мікросередовища, яке підтримує його життя, тобто скафандра. Останній має відповідати вимогам зручності для надягання та знімання, безпеки переміщення, мобільності, уникнення небезпек, забезпечення оглядовості, врівноваження тиску, шуму, світла, здійснення радіаційного моніторингу, комунікації, харчування, споживання води, придатності для надання медичної допомоги та введення ліків, а також виведення природних відходів. Більше того, перед виходом у відкритий космос обов'язково має проводитись оцінка стану здоров'я. При цьому вимогами медичної сертифікації НАСА ОСНМО 80771201MED встановлено, що ризик виходу в космос має становити не більше 15 %, а ступінь впевненості в собі астронавта — не менше 95 % [18].

Останнім етапом еколого-правового убезпечення астронавтів/космонавтів є реабілітація їх після космічних польотів. Кожна космічна держава встановлює свої програми адаптації космонавтів/астронавтів до земних умов після космічних польотів. В цілому вона передбачає обстеження, проведення клінічних лабораторних тестів, стабілізацію здоров'я та лікування, кінцевою метою чого має бути забезпечення здоров'я та безпеки екіпажу, активне спри-

яння поверненню його до передпольотного стану. Разом з цим вимоги до реабілітації після польоту включають реалізацію індивідуальної програми, яка залежить від конкретного типу місії, тривалості та індивідуальних чинників для кожного екіпажу.

Підсумовуючи викладений матеріал, слід зазначити, що з огляду на орієнтацію космічної політики провідних космічних держав на довгострокові пілотовані космічні місії, наразі відбувається масштабний перегляд медичних, біологічних та інших екологічних правил перебування людини в космосі. Зокрема, Розділ IV Акту «Про перехід дозволу» (NASA Transition Authorization Act of 2017) [17], присвячений прискоренню дослідження людиною далекого космосу, містить підрозділ «Д» або «TREAT Astronauts Act», в якому розкриваються основні небезпеки останнього та шляхи їхнього подолання. В секції 442 даного розділу відзначається, що астронавти, які беруть участь у довготривалих космічних польотах та місіях, можуть відчувати підвищений ризик для здоров'я, зокрема погіршення зору, демінералізації кісток, а також психічного здоров'я, продуктивності, а також можуть бути схильні до галактичного космічного опромінення [17]. Виходячи з цього, на сьогодні відбувається процес суттєвого переформатування еколого-правового статусу астронавтів в контексті підготовки до реалізації програм пілотованого дослідження далекого космосу та інших планет, зокрема Марса. Чинні стандарти життєзабезпечення астронавтів розраховані лише на короткострокові (до 340 днів) польоти в межах низької навколоземної орбіти, а тому дослідження далекого космосу пов'язане з суттєвими невизначеностями, а отже й ризиками. У зв'язку з цим наразі розробляється етичний базис новітніх стандартів, який розкривається через такі ключові максими: оптимальне співвідношення ризику і корисності, уникнення шкоди, повага до автономії, чесність та лояльність.

Україна, яка не є Стороною-партнером Угоди щодо співробітництва в рамках МКС (хоча і бере участь на договірних засадах в деяких видах діяльності на цій станції), а також не має досвіду самостійних пілотованих космічних місій, на жаль, поки що не приділяла належної уваги розвитку відповідного блоку космічного законодавства. Норм, які б регламентували правовий статус космонавтів Укра-

їни, на сьогодні немає ні в базовому Законі України «Про космічну діяльність» [7], ані в інших актах законодавства України. До цього часу немає вітчизняної системи відбору кандидатів у космонавти, їхнього навчання та підготовки. А у політико-правових документах, що визначають основні напрямки розвитку галузі (зокрема, в Загальнодержавній цільовій науково-технічній космічній програмі на 2013—2017 рр. [5], в Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 р. [8] та Плані заходів щодо її виконання [6]), містяться лише загальні завдання щодо забезпечення участі вітчизняних космонавтів-дослідників у складі міжнародних екіпажів, зокрема, у космічних експериментах на поверхні Місяця. Вважаємо, що статус однієї з провідних космічних держав світу, який по праву має Україна, зобов'язує її звернути свій погляд і на такий сегмент космічної діяльності, як пілотована космонавтика, приділивши належну увагу підготовці власних космонавтів, які в осяжній перспективі були б спроможні брати участь у різного роду міжнародних космічних місіях, а у перспективі й формувати власні екіпажі пілотованих космічних апаратів. З огляду на це подальший розвиток космічної політики України, заснованої на розширенні співробітництва з космічними державами, які володіють потужним досвідом пілотованих космічних польотів, має включити формування юридичного та нормативно-технічного підґрунтя екологічно безпечної життєдіяльності людини в космосі.

ЛІТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. URI: <http://docs.cntd.ru/document/1200027840>
- Договір про принципи діяльності держав з дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, від 31.10.1967. URI: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/995_480
- Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 28 апреля 2015 года № 493 «Об утверждении Правил отбора кандидатов в космонавты и присвоения статуса кандидата в космонавты, космонавта». URI: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011554#z7>
- Приказ Федерального космического агентства от 11.10.2010 № 156 «Об утверждении Административного регламента Федерального космического агентства по исполнению государственной функции по обеспечению отбора и подготовки космонавтов». URI: <http://ivo.garant.ru/#/document/55170516/paragraph/1:5>
- Про затвердження Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013—2017 роки: Закон України // Відомості Верховної Ради.—2014.—С. 725.
- Про затвердження плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року: розпорядження КМУ від 25.01.2012 р. № 48-р. URI: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/48-2012-p>
- Про космічну діяльність: Закон України від 15.11.96 зі змінами. URI: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/502/96-%D0%B2%D1%80>
- Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року: розпорядження КМУ від 9.03. 2011 р. № 238-р. URI: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/238-2011-p>
- Соглашение между Правительством Канады, Правительствами государств-членов Европейского космического агентства, Правительством Японии, Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки относительно сотрудничества по международной космической станции гражданского назначения. URI: <http://docs.cntd.ru/document/901778188>
- Угода про діяльність держав на Місяці та інших небесних тілах від 11.07.1984. URI: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/995_482
- Active Handbooks. URL: <http://ecss.nl/hbs/published-hbs-on-line/>
- Concept of aeromedical fitness and associated medical certificate requirement. URI: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/European_Astronaut_Selection/Concept_of_aeromedical_fitness_and_associated_medical_certificate_requirement
- ECSS Training material for download. URL: <http://ecss.nl/ecss-training-material-for-download/>
- European astronaut selection: International Space Station Medical Operations Requirements Documents (ISS MORD) International Space Station Program, Revision B, May 2003. URI: <http://emits.sso.esa.int/emits-doc/ESTEC/AO6216-SoW-RD9.pdf>
- NASA-STD-3001 VOL 1 Space Flight Human-System Standard Volume 1, Revision A: Crew Health. URI: <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-3001-vol-1>
- NASA-STD-3001 VOL 2 Space Flight Human System Standard Volume 2: Human Factors, Habitability, and Environmental Health. URI: <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-3001-vol-2;>
- National Aeronautics and Space Administration Transition Authorization Act of 2017. URI: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/442/text>

18. *OCHMO* 110902.2MED NASA Aviation Medical Certification Standards. URI: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Av%20med%20cert%20std%20OCHMO%20110902%203MED.pdf>
19. *Protection of Human Research Subjects* (Revalidated with admin. changes 12/18/2012). URI: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPD&c=7100&s=8E>
20. *Technical Memorandums made available*. URL: <http://ecss.nl/hbs/tms-made-available///>

Стаття надійшла до редакції 24.01.18

REFERENCES

1. GOST R 50804-95 Sreda obitaniya kosmonavta v pilotiruemom kosmicheskom apparate. Obshhie mediko-tekhnicheskie trebovaniya [State standard R 50804-95 Habitat of cosmonaut in manned space object. Common medicine and technical requirements]. URI: <http://docs.cntd.ru/document/1200027840> [in Russian]
2. Dohovor pro pryntsyty diial'nosti derzhav po doslidzhenniu i vykorystanniu kosmichnoho prostoru, vkluchaiuchy Misiats' ta inshi nebesni tila vid 31.10.1967 [Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies]: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/995_480 [in Ukrainian].
3. Prikaz Ministra po investicijam i razvitiju Respubliki Kazahstan ot 28 aprelja 2015 goda № 493 «Ob utverzhdenii Pravil otbora kandidatov v kosmonavty i prisvoeniya statusa kandidata v kosmonavty, kosmonavta» [Decree of the Minister of investment and development on approval of Rules of candidates to the line of cosmonauts selection and assignment the status of candidate of cosmonaut]. URI: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011554#z7> [in Ukrainian].
4. Prykaz Federal'noho kosmycheskoho ahentstva ot 11.10.2010 № 156 «Ob utverzhdenii Admynstrativnoho rehlamenta Federalnoho kosmycheskoho ahentstva po yspolneniyu hosudarstvennoj funktsyy po obespecheniyu otbora y podgotovky kosmonavtov» [Decree of Federal Space agency about approving of administrative regulation of Federal Space Agency about simplification of functions providing the selection to preparing of cosmonauts]. URI: <http://ivo.garant.ru/#/document/55170516/paragraph/1:5> [in Ukrainian].
5. Pro zatverdzhennia Zahal'noderzhavnoi tsil'ovoi nauko-vo-tekhnichnoi kosmichnoi prohramy Ukrainy na 2013-2017 roky: Zakon Ukrainy // Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2014, art.725 [Act about approving state target scientific and technical space program of Ukraine for duration of 2013-2017] [in Ukrainian]
6. Pro zatverdzhennia planu zakhodiv schodo vykonannia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi kosmichnoi diial'nosti na period do 2032 roku: rozporiadzhennia KМУ vid 25.01. 2012 r. № 48-c [Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine on approval of Plan of

- execution of Concept of state policy implementation in the sphere of space activities for the period till 2032]. URI: <http://http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/48-2012-p> [in Ukrainian].
7. Pro kosmichnu diial'nist': Zakon Ukrainy vid 15.11.96 zi zminamy vid 23.12.2015 [Law of Ukraine on space activities]. URI: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/502/96-%D0%B2%D1%80> [in Ukrainian].
8. Pro skhvalennia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi kosmichnoi diial'nosti na period do 2032 roku: rozporiadzhennia KМУ vid 9.03. 2011 r. № 238-d [Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine on approval of the Concept of realizing state policy in the sphere of space activities]. URI: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/238-2011-p> [in Ukrainian].
9. Soglasenie mezhdru Pravitel'stvom Kanady, Pravitel'stvami gosudarstv — chlenov Evropejskogo kosmicheskogo agentstva, Pravitel'stvom Japonii, Pravitel'stvom Rossijskoj Federacii i Pravitel'stvom Soedinennyh Shtatov Ameriki otnositel'no sotrudnichestva po mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii grazhdanskogo naznacheni [International Space Station is a co-operative programme between Europe, the United States, Russia, Canada, and Japan for the joint development, operation and utilisation of a permanently inhabited Space Station in low Earth orbit]. URI: <http://docs.cntd.ru/document/901778188> [in Russian].
10. Uhoda pro diial'nist' derzhav na Misiatsi ta inshykh nebesnykh tilakh vid 11.07.1984 [Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies]. URI: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/995_482 [in Ukrainian].
11. Active Handbooks: <http://ecss.nl/hbs/published-hbs-online/> [in English].
12. Concept of aeromedical fitness and associated medical certificate requirement. URI: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/European_Astronaut_Selection/Concept_of_aeromedical_fitness_and_associated_medical_certificate_requirement [in English].
13. ECSS Training material for download. URL: <http://ecss.nl/ecss-training-material-for-download/> [in English].
14. European astronaut selection: International Space Station Medical Operations Requirements Documents (ISS MORD) International Space Station Program, Revision B, May 2003. URI: <http://emits.sso.esa.int/emits-doc/ESTEC/AO6216-SoW-RD9.pdf> [in English].
15. NASA-STD-3001 VOL 1 Space Flight Human-System Standard Volume 1, Revision A: Crew Health. URI: <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-3001-vol-1> [in English].
16. NASA-STD-3001 VOL 2 Space Flight Human System Standard Volume 2: Human Factors, Habitability, and Environmental Health. URI: <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-3001-vol-2> [in English].
17. National Aeronautics and Space Administration Transition Authorization Act of 2017. URI: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/442/text> [in English].

18. OCHMO 110902.2MED NASA Aviation Medical Certification Standards. URI: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Av%20med%20cert%20std%20OCHMO%20110902%203MED.pdf> [in English].
19. Protection of Human Research Subjects (Revalidated with admin. Changes 12/18/2012). URI: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPD&c=7100&s=8E> [in English].
20. Technical Memorandums made available. URL: <http://ecss.nl/hbs/tms-made-available/> [in English].

Received 24.01.18

Н. Р. Малишева, А. М. Гурова, А. Е. Михайский

Институт государства и права им. В. М. Корецкого
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

ЭКОЛОГО-ПРАВОВОЙ СТАТУС ЧЕЛОВЕКА В КОСМОСЕ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Требования к эколого-правовому обеспечению жизнедеятельности человека в космосе можно объединить в единый массив по двум признакам, которые одновременно являются критериями внутреннего разделения в пределах заданной ими совокупности отношений. Первый признак отражает предметную сферу нормативного влияния, которую условно можно разделить на требования, предъявляемые к людям (медицинские, санитарно-гигиенические и другие), и требования, предъявляемые к среде жизнедеятельности в условиях воздействия факторов космического окружающей среды (невесомость, радиация, освещение и т. д.). Второй признак вытекает из сопровождения эколого-правовыми требованиями полного цикла пилотируемого космического полета (от времени отбора в отряд космонавтов / астронавтов к послеполетной реабилитации). Именно эти две оси позволяют выстроить систему координат обеспечения эколого-правового статуса космонавтов / астронавтов. Кратко изложены основные результаты исследования эколого-правового статуса человека в космическом пространстве на базе анализа норм международного космического права, законодательства ведущих космических государств и Европейского космического агентства.

Ключевые слова: международное космическое право, национальное законодательство, эколого-правовой статус, санитарно-гигиенические нормы, медицинские требования, технические нормативы.

N. R. Malysheva, A. M. Hurova, A. Y. Mykhaiskyi

Volodymyr Koretsky Institute of State and Law of the
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ECOLOGICAL AND LEGAL STATUS OF A HUMAN BEING IN OUTER SPACE: COMPARATIVE ANALYSIS

Expanding the amount of manned space flights requires a strong legal basis devoted ecological promotion of life support. Such field of legal regulation is branched and has some differentiations from one space-faring nation to another that is why it needs to be explored to implement it in the space legislation of Ukraine. Thus, the aim of this article is to observe all stages of life support of manned space missions according to legislation of main actors in such field of space market, i. e. Russian Federation, Republic of Kazakhstan, USA and ESA for taking into account while such a legal base is being developed in Ukraine. To fulfill the aim of this study the statements about life support according to five UN treaties on outer space, International Space Station Intergovernmental Agreement, national decrees, technical regulations, handbooks etc. were used. The research was conducted using methods of analysis, synthesis, comparison, structuring etc. As a result of study all the legal regulation of life support during space missions was structured: firstly, according to subject of regulation on requirements for people (medical, sanitary and other) and requirements imposed on the environment in the conditions of the space environment factors (weightlessness, radiation, lighting, etc.); secondly, according to stages of space missions on preparing to, execution of and rehabilitation after manned space mission. Common and distinctive features of such requirements pursuant to environment legislation of Russian Federation, Republic of Kazakhstan, USA and ESA were identified. Thereby, the following directions of Ukrainian legislation development in the analyzed sphere were outlined: 1) medical, physical, psychological etc. selection criteria for the acquisition of the status of astronauts; 2) requirements for living conditions and readiness to complete the tasks of space missions; 3) system of rehabilitation procedures after manned space mission execution.

Key words: International Law, national legislation, ecological and legal status, sanitary and hygienic norms, medical requirements, technical normative.

ГРИГОРЕНКО Олена Євгенівна — старший науковий співробітник відділення космічної плазми Інституту космічних досліджень Російської академії наук, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — процеси у хвості магнітосфери Землі.

ГРИЦАЙ Асен Васильович — асистент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, озоновий шар.

ГУРОВА Анна Михайлівна — науковий співробітник відділу проблем аграрного, земельного, екологічного та космічного права Інституту держави і права ім. В. М. Корецького Національної академії наук України, кандидат юридичних наук.

Напрямок науки — міжнародне та національне екологічне право, міжнародне та національне космічне право.

ДУДНИК Олексій Володимирович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАН України, старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — космічне приладобудування, детектори заряджених частинок високих енергій, фізика земної магнітосфери, радіаційні пояси Землі, сонячно-земні зв'язки.

ЗАЛІЗОВСЬКИЙ Андрій Владиславович — завідувач відділу радіофізики геокосмосу, Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — радіофізика геокосмосу.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

КАЩЕЄВ Антон Сергійович — науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук. Запрошений вчений Міжнародного центру теоретичної фізики імені Абдуса Салама (м. Трієст, Італія).

Напрямок науки — радіоастрономія.

КАЩЕЄВ Сергій Борисович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — радіоастрономія.

КОВАЛІНСЬКИЙ Мирослав (KOWALIŃSKI Mirosław) — директор відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, доктор філософії з електроніки і інженерного програмування.

Напрямок науки — електроніка, комп'ютерні науки.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика навколоземного космічного простору.

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

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

КОЛОСКОВ Олександр Валерійович — провідний науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — радіоастрономія.

КОШМАН Георгій Валерійович — інженер першої категорії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — приладобудування.

КРОНБЕРГ Олена Олександрівна — науковий співробітник відділу Землі та навколишнього середовища Інституту дослідження Сонячної системи ім. Макса Планка, Геттінген, Німеччина.

Напрямок науки — фізика навколоземного космічного простору.

КУНДЕЛЬКО Ірина Едуардівна — магістр кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

КУРБАТОВ Євген Володимирович — інженер 1-ї категорії Радіоастрономічного інституту НАН України.

Напрям науки — розробка, виготовлення та тестування вузлів супутникових приладів для реєстрації зарядженої радіації високої енергії.

ЛАЗАРЄВ Ігор Вікторович — науковий співробітник Інституту сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — вирощування органічних монокристалів, органічні полікристалічні сцинтилятори, радіолюмінісценція.

ЛИСАЧЕНКО Володимир Миколайович — провідний інженер-радіофізик Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ЛУЇ Ентоні Т. Я. — головний науковий співробітник лабораторії прикладної фізики університету імені Джона Хопкінса, професор.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

МАЛИШЕВА Наталія Рафаелівна — завідувач відділу правових проблем аграрного, земельного, екологічного та космічного права Інституту держави і права імені В.М. Корецького Національної академії наук України, заступник директора Міжнародного центру космічного права при цьому ж Інституті, доктор юридичних наук, професор, академік Національної академії правових наук, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики Міжнародної астрономічної академії; Заслужений юрист України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — міжнародне та національне екологічне право, міжнародне та національне космічне право, європейське право.

МИХАЙСЬКИЙ Олексій Євгенович — аспірант відділу проблем аграрного, земельного, екологічного та космічного права Інституту держави і права ім. В. М. Корецького Національної академії наук України, магістр права.

Напрям науки — національне екологічне та космічне право країн світу.

МІЛНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович — завідувач науково-дослідної лабораторії «Фізика космосу» кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук. Головний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної ака-

демії наук України. Співробітник Міжнародного центру науки майбутнього Цилінського університету, Чанчунь, Китай.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоземного космічного простору.

МІЩЕНКО Олександра Василівна — молодший науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — динаміка космічних систем та їх взаємодія з іоносферною плазмою, динаміка твердого тіла, теорія коливань.

ПАЗНУХОВ Вадим Володимирович — вчений-дослідник/провідний дослідник Інституту наукових досліджень (Бостон коледж, США), PhD.

Напрям науки — радіоастрономія.

ПЕТРЕНКО Богдан Артемович — магістр кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

ПИРОЖЕНКО Олександр Володимирович — провідний науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — динаміка космічних систем, теоретична механіка, теорія коливань, стійкість руху, регулярна та хаотична динаміка, нелінійна механіка.

ПІКУЛІК Іван Іванович — інженер Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ПОДГУРСЬКИЙ Петро (PODGÓRSKI Piotr) — спеціаліст з електронної інженерії Відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, магістр наук.

Напрям науки — електроніка, детектори, комп'ютерні науки.

ПРОХОРЕНКОВ Андрій Сергійович — співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — завідувач відділу атмосферної оптики та приладобудування Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — поляриметрія, космічне приладобудування.

СОПІН Андрій Олександрович — науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — радіоастрономія.

СОСОНКІН Михайло Григорович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — космічне приладобудування, фізика атмосфери.

СЫСІСЛОВСЬКИЙ Данієл (ŚCISŁOWSKI Daniel) — спеціаліст з електронної інженерії Відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, магістр наук.

Напрямок науки — електроніка, детектори, комп'ютерні науки.

ТКАЧЕНКО Олександр Іванович — старший науковий співробітник Міжнародного науково-навчального

центру інформаційних технологій і систем Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — навігація та керування рухомими об'єктами.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЧЕРЕМНИХ Сергій Олегович — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Моїсійович — головний науковий співробітник, Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — радіоастрономія.