

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 18  
6 + 2012

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

## ЗМІСТ

## CONTENTS

Шувалов В. А., Корепанов В. Е., Лукенюк А. А., Токмак Н. А., Кочубей Г. С. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2»

Костюченко Ю. В., Соловьев Д. М., Ющенко М. В., Дудгин С. С., Копачевский И. М., Билоус Ю. Г., Артеменко И. Г. Застосування даних наземних полігонних спектрометрических вимірювань для калібрування даних ДЗЗ в задачах оцінки гідрологічної безпеки

Дудник А. В., Прето М., Курбатов Е. В., Санчез С., Тимакова Т. Г., Титов К. Г., Парра П. Малогабаритный прибор для мониторинга электронов и ядер высоких энергий в открытом космическом пространстве

Хижняк В. В., Деденок В. П., Ткаченко А. А. Ионосферные возмущения перед сильными землетрясениями на Гаити ( $M = 7.2$ ) и в Японии ( $M = 9.0$ ) по данным спутниковых радионавигационных систем

Пилипенко С. Г., Козак Л. В. Ветровые сдвиги в атмосфере Земли над мощными ураганами

- 5 *Shuvalov V. A., Korepanov V. E., Lukenyuk A. A., Tokmak N. A., Kochubey G. S.* Modeling of probe measurements of plasma environment parameters onboard the spacecraft «Sich-2»
- 14 *Kostyuchenko Yu. V., Solovyov D. M., Yushchenko M. V., Dudgin S. S., Kopachevsky I. M., Bilous Yu. H., Artemenko I. G.* The use of results of ground-based test site spectrometric measurements for the calibration of satellite observations to estimate hydrological and hydrogeological security
- 22 *Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V., Sanchez S., Timakova T. G., Titov K. G., Parra P.* A small-sized device for monitoring of high-energy electrons and nuclei in the outer space
- 35 *Khizhniak V. V., Dedenok V. P., Tkachenko A. O.* Ionospheric disturbances before the great earthquakes in Haiti ( $M = 7.2$ ) AND Japan ( $M = 9.0$ ) from data of satellite radionavigation systems
- 43 *Pilipenko S. G., Kozak L. V.* Wind shifts in the Earth's atmosphere over powerful hurricanes

<i>Шевченко Г. В., Кордюм Е. Л. Использование трансгенных растений <i>Arabidopsis thaliana</i>-GFP-ABD2 в экспериментах по изучению цитоскелета в условиях моделированной микротяжести</i>	<b>51</b>	<i>Shevchenko G. V., Kordyum E. L. Application of transgenic <i>Arabidopsis thaliana</i>-GFP-ABD2 plants in experiments for the investigation of cytoskeleton in simulated microgravity</i>
<i>Мищущина И. И. Влияние концентрации пыли в при-стеночном слое кометного ядра на начальные условия моделей газопылевого течения в столкновительной об-ласти атмосферы</i>	<b>57</b>	<i>Mischyshyna I. I. The effect of the dust concentration in the Knudsen layer of a comet on initial conditions in models of the dusty gas flow in a comet's atmosphere</i>
<i>Куличенко Н. А., Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибириако-ва Е. С. Использование ТВ-камер для наблюдений ме-теоров</i>	<b>67</b>	<i>Kulichenko N. A., Shulga A. V., Kozyrev E. S., Sibiriakova E. S. The use of TV cameras for meteor observations</i>
<i>Янків-Вітковська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: пер-ші результати</i>	<b>73</b>	<i>Yankiv-Vitkovska L. M. On ionosphere parameter calculat-ing with the use of a special algorithm: first results</i>
<i>Іщенко М. В. Центр аналіза ГНСС-даних ГАО НАН України: результати репроцесинга GPS-наблюде-ний на перманентних станціях регіональної мережі для GPS-недель 1236—1399</i>	<b>76</b>	<i>Ischenko M. V. The GNSS data analysis centre of the Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine: some results of observation reprocessing of GPS observations at permanent stations of the regional network for GPS weeks 1236-1399</i>
<i>Вавилова І. Б., Вавілов С. С. 50-та річниця польоту у кос-мос першого космонавта-українця Павла Романовича Поповича</i>	<b>81</b>	<i>Vavylava I. B., Vavilov S. S. 50<sup>th</sup> Spaceflight anniversary of the first Ukrainian-origin cosmonaut Pavlo Popovich</i>

**НАШІ АВТОРИ**

**86 OUR AUTHORS**

**АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК**

**89 INDEX**

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

---

Підписано до друку 12.12.12. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет. Ум. друк. арк. 9,66. Обл.-вид. арк. 10,14. Тираж 100 прим. Зам. № 3447.

---

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

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

*3 листопада 2012 р. виповнилось 80 років  
члену редколегії журналу «Космічна наука і технологія»,  
члену-кореспонденту Національної академії наук України,  
доктору біологічних наук,  
Елизаветі Львівні КОРДЮМ*

*28 листопада 2012 р. виповнилось 85 років  
члену редколегії журналу «Космічна наука і технологія»,  
академіку Національної академії наук України,  
доктору фізико-математичних наук,  
Миколі Володимировичу СТЕШЕНКУ*

*Редакційна колегія журналу сердечно вітає  
Елизавету Львівну та Миколу Володимировича  
з ювілеями і зичить їм міцного здоров'я та наслаги  
для здійснення всіх їхніх творчих задумів*

В. А. Шувалов<sup>1</sup>, В. Е. Корепанов<sup>2</sup>, А. А. Лукенюк<sup>2</sup>, Н. А. Токмак<sup>1</sup>, Г. С. Кочубей<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут технічної механіки Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

<sup>2</sup> Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України, Львів

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ НА КА «СИЧ-2»

---

Розроблено процедуру чисельного та фізичного (стендового) моделювання зондової вимірювань параметрів навколосяутникового середовища на КА «Сич-2». Відповідність розрахованих та вимірюваних значень рівноважного потенціалу ізольованої сфери зонда EZ свідчить про коректність процедури моделювання та допустиму точність визначення температури і концентрації електронів у навколосяутникової плазмі на полярній орбіті КА «Сич-2».

---

### ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат «Сич-2» запущен 17 августа 2011 г. ракетой-носителем «Днепр» на гелиосинхронную орбиту высотой 700 км и наклонением 98°. КА «Сич-2» оснащен научной аппаратурой для диагностики околоспутниковой среды. В состав аппаратуры входят следующие элементы.

1. Детектор нейтральных частиц DN, состоящий из двух зондов давления с инверсно-магнетронными преобразователями (ИМП) в качестве чувствительных элементов. Нормали к апертурам входных отверстий ИМП взаимно ортогональны. При измерениях нормаль  $\mathbf{n}_1$  к апертуре первого датчика ИМП должна быть параллельна вектору скорости  $\mathbf{U}_{\infty}$  полета КА ( $\theta_1 = 0$ ), нормаль к апертуре входного отверстия второго датчика  $\mathbf{n}_2$  — перпендикулярна к вектору скорости  $\mathbf{U}_{\infty}$  ( $\theta_2 = \pi/2$ ). Здесь  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы между нормалями  $\mathbf{n}_{1,2}$  и вектором  $\mathbf{U}_{\infty}$ . Схема зонда давления приведена в работе [23].

2. Электрический зонд DE — одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра радиусом  $r_p =$

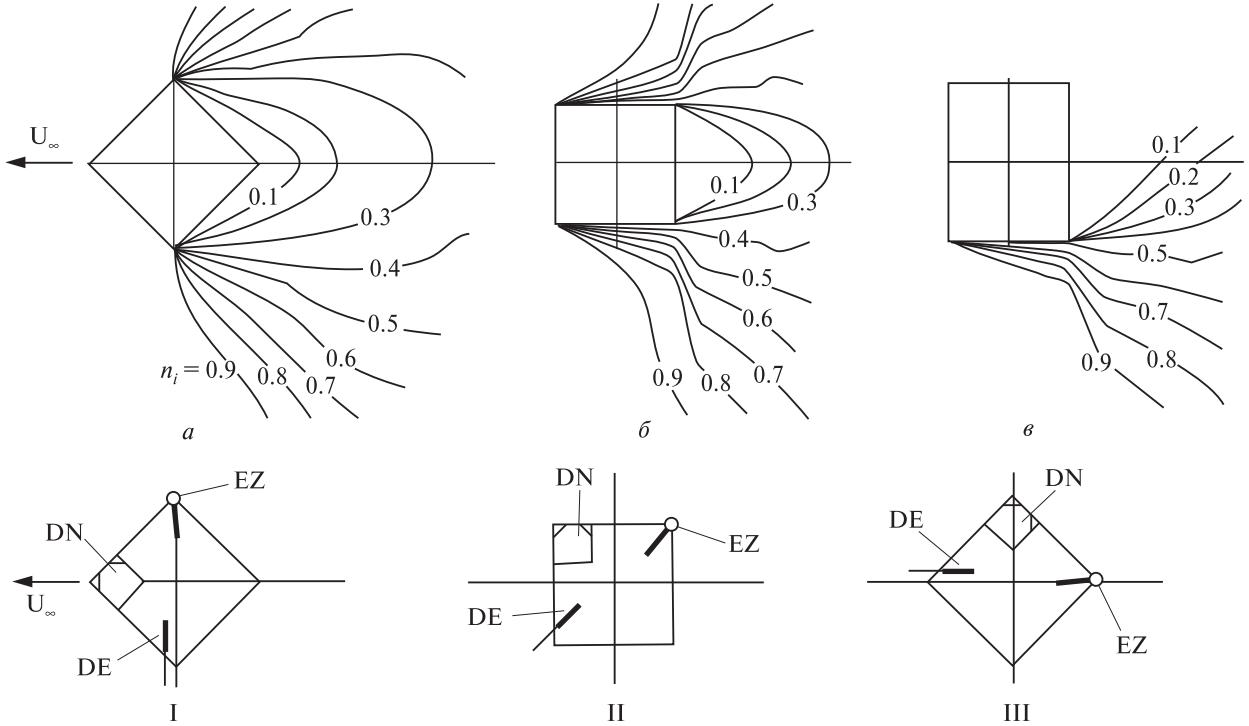
$= 0.05$  см и длиной  $l_p = 12.0$  см с охранным электродом радиусом  $r_g = 0.2$  см и длиной  $l_g = 12.5$  см. При измерениях вольтамперных характеристик зонда Ленгмюра должна быть ортогональна к вектору скорости  $\mathbf{U}_{\infty}$  полета КА. Детекторы DN и DE разработаны и изготовлены в Институте технической механики и предназначены для определения комплекса кинетических параметров нейтральных и заряженных частиц ионосферной плазмы.

3. Электрический зонд EZ — сфера диаметром  $2r_{ps} \approx 6.0$  см, покрытая стеклоуглеродом. Зонд предназначен для измерения и контроля потенциала КА.

4. Блок системы сбора научной информации (ССНИ) и зонд EZ разработаны и изготовлены Львовским центром Института космических исследований.

### ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА КА «СИЧ-2»

В силу ряда технических обстоятельств, связанных с размещением зондов на установочной плите космической платформы, для корректировки выходных сигналов зондов возникла необходимость численного и физического моделирования



**Рис. 1.** Численное решение задачи обтекания платформы КА «Сич-2» сверхзвуковым потоком ионосферной разреженной плазмы: *a, б, в* — распределение изоконцентралей ионов у поверхности платформы; I, II, III — ориентация платформы относительно вектора скорости полета

зондовых измерений параметров околоспутниковой среды на КА «Сич-2». Рис. 1 иллюстрирует результаты численного решения задачи обтекания платформы КА «Сич-2» сверхзвуковым потоком ионосферной разреженной плазмы — распределение изоконцентралей  $n_i = N_i / N_{i\infty}$  ( $N_i$ ,  $N_{i\infty}$  — концентрация ионов в возмущенной и невозмущённой плазме). На рис. 1, *a* и *б* показана структура возмущённой зоны для трёх положений платформы (I; II и III) и зондов DN, DE, EZ относительно вектора скорости  $U_\infty$  полета КА. Изоконцентралы рис. 1, *в* характеризуют распределение ионов плазмы при обтекании нижней части платформы вблизи установочной плиты. Распределение изоконцентралей ионов плазмы — численное решение задачи плоского обтекания платформы КА «Сич-2» сверхзвуковым потоком разреженной плазмы — решение системы уравнений самосогласованного поля

$$\mathbf{c}_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{r}} + \frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{c}_\alpha} = 0,$$

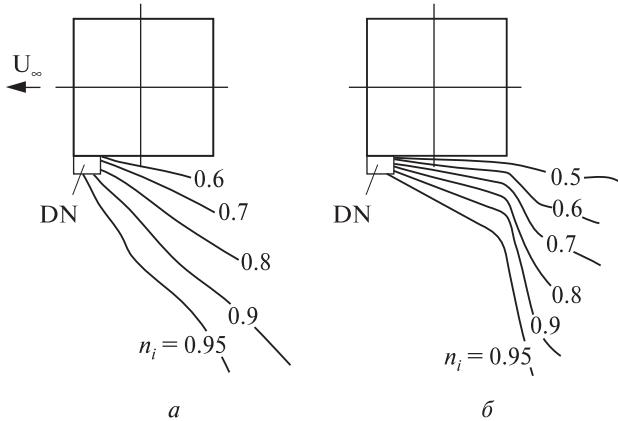
$$\Delta\Phi = \left( \frac{R}{\lambda_d} \right)^2 \sum_\alpha \int f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{c}_\alpha) d\mathbf{c}_\alpha \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\Phi(\infty) = 0, \quad f_\alpha(\infty, \mathbf{c}_\alpha) = \pi^{-3/2} \exp[-(\mathbf{c}_\alpha - \mathbf{S}_\alpha)^2],$$

$$\Phi(R) = \Phi_W, \quad f_\alpha(R, \mathbf{c}_\alpha) = 0, \text{ если } \mathbf{n}\mathbf{c}_\alpha > 0. \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{c}_\alpha$  и  $f_\alpha$  — скорость и функция распределения частиц сорта  $\alpha$  ( $\alpha = e, i, n$  — электроны, ионы и нейтралы),  $\Phi(\mathbf{r}) = e\Phi(\mathbf{r})/(kT_e)$  — безразмерный потенциал электрического поля,  $e$  — заряд частицы,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки пространства,  $R$  — характерный размер тела,  $\lambda_d$  — дебаевский радиус в невозмущённой плазме,  $S_\alpha = U_\infty / \sqrt{2kT_\alpha / M_\alpha}$  — скоростное отношение,  $U_\infty$  — скорость потока,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_\alpha$ ,  $M_\alpha$  — температура и масса частиц сорта  $\alpha$ ,  $\Phi_W = e\Phi_W/(kT_e)$ ,  $\Phi_W = \Phi_p - \Phi_0$  — потенциал поверхности тела  $\Phi_p$  относительно потенциала плазмы  $\Phi_0$ . Подходы, процедуры и алгоритмы решения системы уравнений (1) с



**Рис. 2.** Распределение изоконцентралей нейтралов (*а*) и ионов (*б*) вблизи детектора DN на платформе (численное моделирование)

граничными условиями (2) подробно описаны в работах [18, 19, 21].

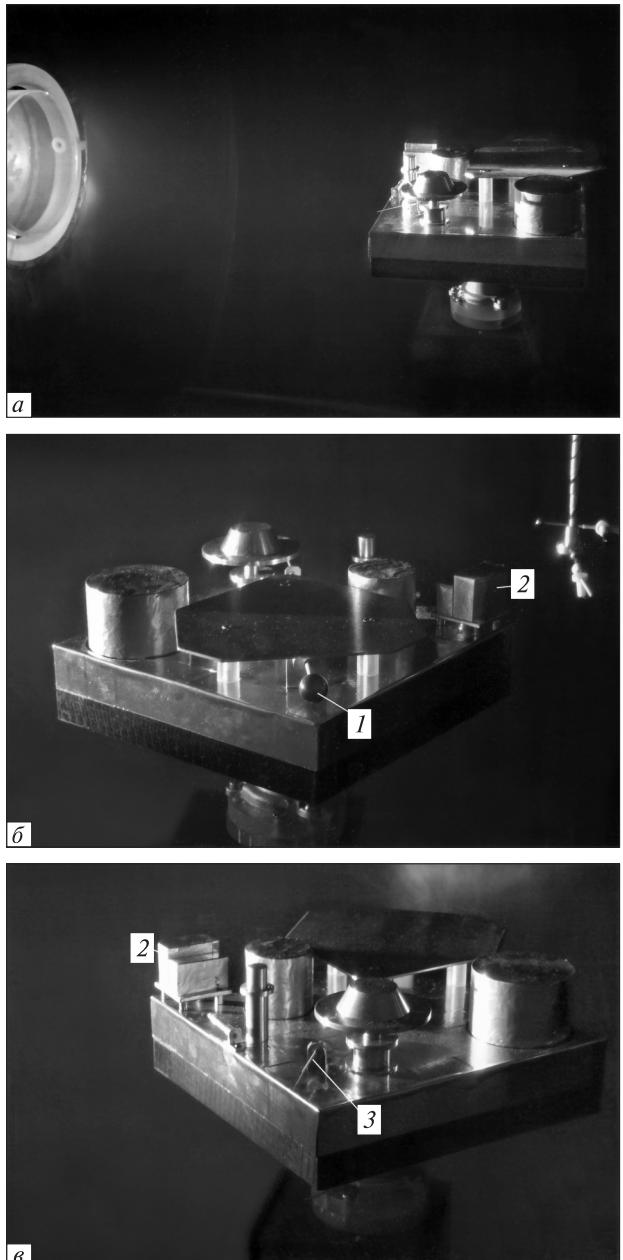
Распределения изоконцентралей ионов  $n_i = N_i / N_{i\infty}$  (рис. 1) иллюстрируют решение идеализированной задачи обтекания гладкой поверхности платформы без надстроек, антенн и других элементов конструкции. Расположению зондов DE и EZ на платформе соответствуют значения  $n_i \approx 0.5 - 0.6$ .

Изоконцентрали нейтралов  $n_n = N_n / N_{n\infty}$  и ионов  $n_i = N_i / N_{i\infty}$  для детектора DN показаны на рис. 2, *а* и *б* соответственно. Распределение нейтралов  $n_n$  аппроксимируется выражением [7]

$$n_n = \frac{N_n}{N_{n\infty}} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\rho}{t} \right) \right] \quad (3)$$

при  $0 \leq t \leq 1$ , где  $t = z / R$ ,  $\rho = S_n x / R$ ,  $S_n = U_\infty / \sqrt{2kT_n / M_n}$ ,  $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$  — интеграл вероятности. Для детектора DN на КА «Сич-2» при  $S_n \approx 5.66$ ,  $\rho = 0.6$  и  $t = 0.27$  из выражения (3) следует  $n_n \approx 0.94$ .

Для уточнения поправок к вольтамперным характеристикам электрических зондов в условиях, соответствующих реальной структуре обтекания поверхности установочной плиты КА «Сич-2», на плазмодинамическом стенде ИТМ выполнено физическое моделирование зондовых измерений на макете платформы КА в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы. Вакуумная камера



**Рис. 3.** Макет платформы КА «Сич-2» в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы на стенде ИТМ: *а* — в потоке плазмы, *б* — модели зондов EZ (1) и DN (2) на макете платформы, *в* — модели зондов DN (2) и DE (3) на макете платформы

стенда показана на рис. 2 работы [25]. Физическое моделирование осуществлялось для макета платформы КА «Сич-2», выполненного в масштабе M 1:4. Макет в сверхзвуковом потоке разре-

женной плазмы азота показан на рис. 3. Цифрами обозначены макеты зондов: 1 — EZ, 2 — DN; 3 — DE.

Взаимодействие диагностических зондов с высокоскоростным потоком неравновесной разреженной плазмы в условиях бесстолкновительного обтекания в ионосфере характеризуют семь параметров подобия и масштабных коэффициентов [3]:

- отношение направленной скорости потока  $U_\infty$  (полёта КА) к тепловой скорости нейтральных частиц  $S_n = U_\infty / \sqrt{2kT_n / M_n}$ ,
- отношение  $U_\infty$  к скорости ионного звука  $S_{ie} = U_\infty / \sqrt{2kT_e / M_i}$ ,
- отношение характерного размера (радиуса) зонда  $r_p$  к дебаевскому радиусу в невозмущённой плазме  $r_p / \lambda_d$ ,
- безразмерный потенциал  $\Phi_W = e\varphi_W / (kT_e) = e(\varphi_p - \varphi_0) / (kT_e)$  зонда  $\varphi_p$  относительно потенциала плазмы  $\varphi_0$ ,
- степень неизотермичности плазмы  $T_i / T_e$ ,
- отношение характерного размера зонда  $r_p$  к лармировским радиусам ионов и электронов  $r_p / r_{i,e}$ .

К дополнительным параметрам подобия и масштабным коэффициентам, характеризующим взаимодействие «зонд — плазма», относятся:

- скоростное отношение для электронов плазмы  $S_e = U_\infty / \sqrt{2kT_e / M_e}$ ,
- отношение потенциала зонда  $e\varphi_W$  к энергии направленного движения ионов  $e\varphi_W / (0.5M_i U_\infty^2)$  или  $\Phi_W / S_{ie}^2$ ,
- диапазон измеряемых давлений инверсно-магнетронными преобразователями детектора нейтральных частиц:  $P_{1\max}(\theta_1 = 0)$  и  $P_{2\min}(\theta_2 = \pi/2)$ .

Параметры подобия позволяют получить критериальные соотношения, устанавливающие связь между параметрами потока плазмы в ионосфере и на стенде [9, 20].

Лабораторная плазма существенно неравновесна. С помощью имеющихся плазменных ускорителей практически не удается получить поток разреженного частично ионизованного газа со степенью неизотермичности, эквивалентной значениям параметра  $T_i / T_e$  в ионосфере. На практике при моделировании взаимодействия

КА с ионосферной плазмой целесообразнее ориентироваться на температуру электронов потока лабораторной разреженной плазмы  $T_{eM}$ . При заданном отношении температур  $T_{eM} / T_e = \xi_M$  масштабный коэффициент  $r_p / \lambda_d$  позволяет получить соотношение для концентрации заряженных частиц (электронов)  $N_{eM} / N_e = \xi_M \beta_M^{-2}$ , где индекс « $M$ » относится к параметрам потока лабораторной плазмы. Критерий геометрического моделирования  $\beta_M = r_{pM} / r_p$  при соответствующем подобии формы электрических зондов определяется отношением характерного размера  $r_{pM}$  зонда (радиуса) на стенде к характерному размеру зонда  $r_p$  в ионосфере. Используя масштабные коэффициенты  $r_p / r_e$ ,  $S_{ie}$  и  $\Phi_W$  при  $M_{iM} / M_i = a_M$ , получим соотношения для индукции внешнего магнитного поля  $B_M / B = \xi_M^{0.5} \beta_M^{-1}$ , скорости направленного движения ионов плазмы  $U_{\infty M} = U_\infty (\xi_M / a_M)^{0.5}$  и условия для потенциалов электрического зонда  $\Phi_{iM} = \Phi_W \xi_M$ .

В предложении однородности химического состава либо преобладания молекул одного сорта нейтралов в ионосфере и в лабораторных условиях на стенде для выходного сигнала ИМП следует  $P_M = P c_M b_M$ , где  $c_M = N_{nM} / N_n$ ,  $b_M = T_{nM} / T_n$ .

#### ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПЛАЗМЕ НА КА «СИЧ-2»

**Моделирование зондовых измерений на КА «Сич-2».** Поток электронов на поверхность электрического зонда (цилиндр, сфера) при положительных относительно плазмы потенциалах может быть представлен в виде

$$I_e = A_p j_{0e} i_e^- (\Phi_W, r_p / \lambda_d).$$

Здесь  $A_p$  — площадь поверхности зонда,  $j_{0e} = eN_e [kT_e / (2\pi M_e)]^{0.5}$  — хаотический ток электронов,  $i_e^-$  — безразмерный коэффициент тока электронов. Расчётные значения коэффициента  $i_e^-$  (цилиндр, сфера) для широкого диапазона параметров плазмы приведены в работах [23, 32].

Собирание ионного тока электрическим зондом в потоке неравновесной разреженной плазмы характеризует зависимость [23, 29]

$$I_i = A_p j_{0i} i_i^+ (\Phi_W, r_p / \lambda_d, S_{ie}, T_i / T_e),$$

где  $j_{0i} = eN_i [kT_e / (2\pi M_i)]^{0.5}$  — хаотический ток,

$i_i^+$  — безразмерный коэффициент ионного тока. Расчёты значения безразмерного коэффициента ионного тока  $i_i^+$  для широкого диапазона параметров потока разреженной плазмы приведены в работах [11, 12, 24, 29, 34, 35].

Приведенные критериальные соотношения и масштабные коэффициенты позволяют оценить параметры потока лабораторной разреженной плазмы, пригодной для моделирования измерений на орбите, и в предположении идентичности режимов соприятия зондового тока в ионосфере и на стенде получить соотношения для электронного тока на цилиндрический зонд:

$$I_{eM} / I_e = \eta_M \xi_M^{3/2} \chi_{eM} \beta_M^{-1}$$

и сферический зонд:

$$I_{eM} / I_e = \xi_M^{3/2} \chi_{eM},$$

где  $\eta_M = l_{pM} / l_p$ ,  $\chi_{eM} = i_{eM}^- / i_e^-$ .

Для ионного тока в высокоскоростном потоке разреженной плазмы на цилиндрический зонд:

$$I_{iM} / I_i = \eta_M \xi_M^{3/2} \chi_{iM} / \beta_M^{-1} a_M^{0.5}$$

и на сферический зонд:

$$I_{iM} / I_i = \xi_M^{3/2} \chi_{iM} / a_M^{0.5}.$$

Здесь  $\chi_{iM} = i_{iM}^+ / i_i^+$ .

В качестве эталонных для сравнения и контроля точности приняты зондовые характеристики, измеренные в ионосфере на ИСЗ «Интеркосмос-10» (цилиндрический зонд радиусом  $r_p = 0.05$  см и длиной  $l_p = 11.6$  см [12]) и на ИСЗ DEMETER (цилиндрический зонд радиусом  $r_p = 0.3$  см и длиной  $l_p = 5.0$  см; сфера радиусом  $r_p = 2$  см [33]).

При оценке влияния возмущений околоспутниковой среды элементами конструкций и антennами, расположенными на плате установочной КА «Сич-2», использовались зонды-макеты: цилиндрический зонд — макет DE радиусом  $r_{pM} = 0.012$  см и длиной  $l_{pM} = 3$  см; сферический зонд — макет EZ радиусом  $r_{pM} = 0.75$  см, а также одиничный цилиндрический зонд Ленгмиора из молибденовой нити радиусом  $r_p = 45$  мкм и длиной  $l_p = 0.45$  см и сфера диаметром  $2r_p = 0.25$  см. Зонды и макет установочной платы размещались в вакуумной камере стенда (цилиндр

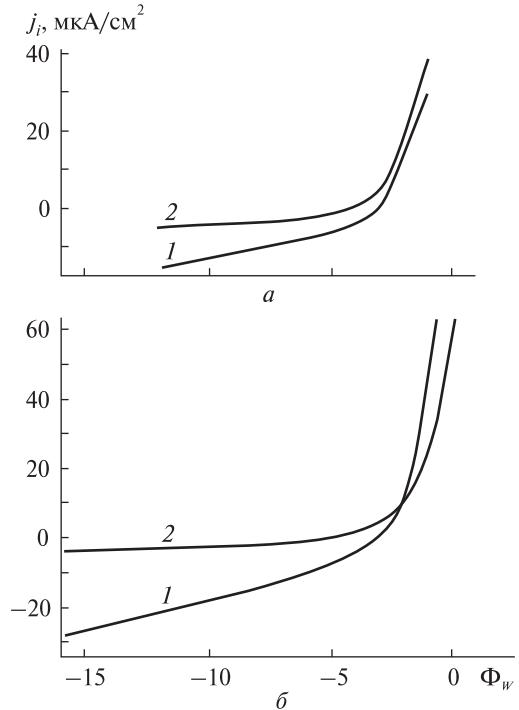
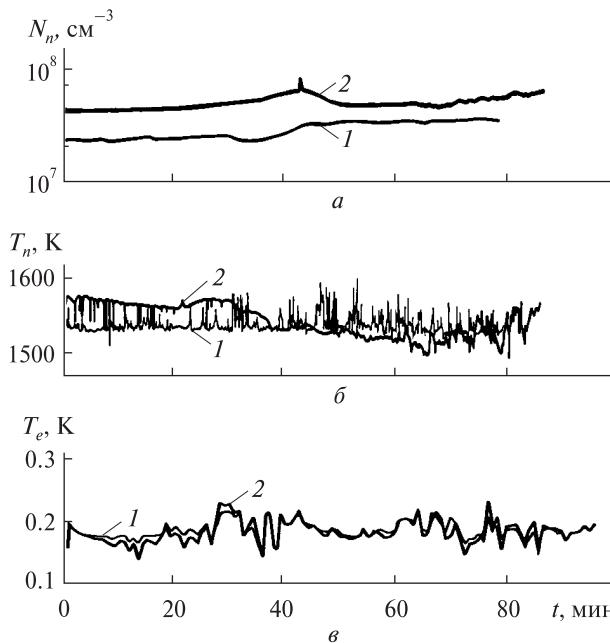


Рис. 4. Вольтамперные характеристики моделей зондов DE (а) и EZ (б): 1 — в невозмущенном потоке плазмы, 2 — в возмущенной зоне на макете установочной платы КА «Сич-2»

длиной 1.2 м и длиной 3.5 м) на подвижных платформах верхнего и нижнего координатников с четырьмя степенями свободы каждый: продольное и поперечное перемещение в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Точность отсчета для линейных перемещений 0.5 мм, для угловых — 0.5°. Измерения вольтамперной характеристики зондов проводились при рабочем давлении 1 мПа в потоке плазмы азота с массовой скоростью  $U_\infty \approx 10.3$  км/с при концентрации заряженных частиц  $N_{e,i} \approx 2 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup> и температуре электронов  $T_e \approx 2.5 \cdot 10^4$  К. Точность определения концентрации электронов контролировалась СВЧ-интерферометрами, работающими на частотах 5.45 и 9.8 ГГц [20].

На рис. 4, а показаны ионные ветви вольтамперной характеристики зонда-макета DE, измеренные в невозмущенном потоке разреженной плазмы (кривая 1) и зонда-макета (кривая 2), ус-



**Рис. 5.** Временные вариации концентрации, температуры нейтральных частиц и «холодных» электронов: 1 — летные испытания 1 сентября 2011 г. (начало UT = = 00 ч 23 мин 37 с), 2 — летные испытания 14 сентября 2011 г. (начало UT = 00 ч 57 мин 15 с)

тановленного на модели КА «Сич-2». При ориентации оси зонда-макета ортогонально вектору скорости потока  $\mathbf{U}_\infty$  отношения плотностей токов насыщения ионов  $j_{i2} / j_{i\infty} \approx N_{i2} / N_{i\infty} = n_i \approx 0.45—0.52$  близки к значению  $n_i \approx 0.5—0.6$ , полученному по результатам численного моделирования (индекс «2» соответствует измерениям в возмущённой зоне на макете установочной плиты). В отличие от ионной ветви вольтамперной характеристики плотность электронного тока насыщения  $j_{e_2}(\Phi_W)$  в возмущённой зоне практически не зависит от ориентации зонда относительно вектора скорости потока  $\mathbf{U}_\infty$ .

Зависимости плотности ионного тока  $j_i(\Phi_W)$ , измеренные на макете зонда EZ в потоке невозмущённой плазмы (кривая 1) и на макете зонда EZ на модели КА (кривая 2) представлены на рис. 4, б. Для сферы (зонда EZ) соотношение плотностей ионного тока, собираемого в невозмущенной плазме и на макете КА  $j_{i2} / j_{i\infty} \approx n_i \leq 0.4$ , учитывалось при анализе выходных сигналов зонда.

Выходной сигнал зонда EZ соответствует равновесному («плавающему») потенциалу изолированной сферы в полярной ионосфере, который формируется потоком заряженных частиц плазмы на борту КА «Сич-2». Уравнение баланса токов на поверхности сферы в авроральной зоне ионосферы может быть представлено в виде [22]:

$$\sum_{\alpha} j_{\alpha}(\Phi_W) = j_{e_a} - (j_i + j_{er_a} + j_{eb_a} + j_{ei} + j_{\gamma}) = 0, \quad (4)$$

где  $j_{e_a}$  — плотность тока облучающих поверхность зонда электронов ( $\alpha \equiv s, h$ ; индекс «s» соответствует «холодным» электронам ионосферной плазмы, «h» — быстрым авроральным электронам),  $j_i$  — плотность тока ионов «холодной» ионосферной плазмы,  $j_{er_a}$  — плотность вторичных электронов,  $j_{eb_a}$  — плотность обратно рассеянных электронов,  $j_{ie}$  — плотность тока вторичной ионно-электронной эмиссии,  $j_{\gamma}$  — плотность фототока. Из (4) следует уравнение

$$j_{e_h}(1 - \sigma_{e_h}) \exp(\Phi_{e_h}) + j_{e_s}(1 - \sigma_{e_s}) \exp(\Phi_{e_s}) - (1 + \gamma_i) j_i - j_{\gamma} = 0. \quad (5)$$

Здесь  $\sigma_{e_h}$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии авроральных электронов,  $\sigma_{e_s}$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии «холодных» электронов ионосферной плазмы,  $\gamma_i$  — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии,  $\Phi_{e_a} = e\varphi_W / (kT_{e_a})$ ,  $T_{e_a}$  — температура ионосферных и авроральных электронов.

При  $T_{e_s} / T_{e_h} \ll 1$  из (5) следует

$$\varphi_W = -\frac{kT_{e_s}}{e} \ln \left[ \frac{j_{e_s} k_{e_s}(B)(1 - \sigma_{e_s})}{(1 + \gamma_i) j_i + j_{\gamma} - j_{e_h}(1 - \sigma_{e_h})} \right], \quad (6)$$

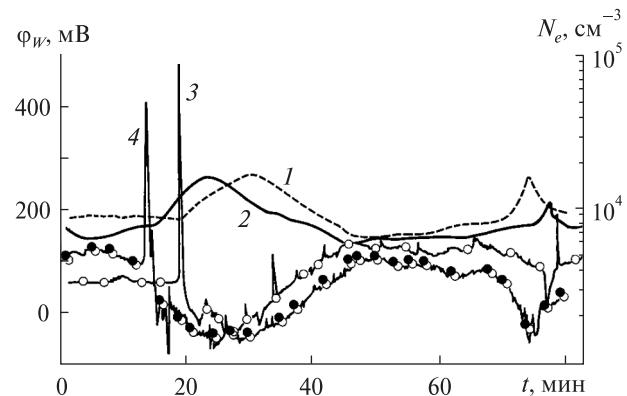
где  $k_{e_s}(B)$  — коэффициент, учитывающий влияние внешнего магнитного поля на сопирание электронов поверхностью сферы.

**Зондовые измерения параметров плазмы.** На рис. 5 показаны временные вариации концентрации  $N_n$  и температуры  $T_n$ ,  $T_e$  нейтральных частиц и «холодных» электронов, вычисленные по выходным сигналам DN и электронному току вольтамперных характеристик зонда DE, измеренных в ходе летних испытаний на КА «Сич-2» 01.09.2011 г. (кривая 1) и 14.09.2011 г. (кривая 2). С учётом соотношений для плотностей токов на поверхности сферы (рис. 4, б) вариации концен-

трации холодных электронов  $N_e(t)$  на поверхности зонда EZ в момент измерений потенциала  $\Phi_W$  показаны на рис. 6 кривыми 1 и 2 соответственно. Вариации  $\Phi_W(t)$  выходных сигналов зонда EZ иллюстрируют кривые 3 и 4. Кружками и точками показаны рассчитанные по формуле (6) значения  $\Phi_W$ .

Значения коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\sigma_{e_s}$  на поверхности зонда EZ из стеклоуглерода определялись в выражении (6) из условия равенства энергий электронов, бомбардирующих поверхность, и работы выхода  $\chi_W$  материала зонда. Этому условию соответствует углерод [5, 14]:  $\sigma_{e_s}(T_{e_s} \approx 0.2 \text{ эВ}) \approx 0.32$ .

Индукция магнитного поля в авроральной зоне  $B \approx 62 \text{ мГц}$  [2, 6]. Ларморовский радиус «холодных» электронов при  $T_{e_s} \approx 2500 \text{ К}$  равен  $r_{e_s} \approx 2.5 \text{ см}$ . Для зонда EZ отношению  $r_p / r_{e_s} \approx 1.2$  (согласно теориям собирания электронов сферическим зондом в магнитном поле [4, 6, 8, 36, 38]) соответствует значение коэффициента  $k_{e_s}(B) \approx 0.7$ . При концентрации «холодных» электронов  $N_{e_s} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$  плотность электронного тока на сферическую поверхность зонда EZ  $j_{e_s} \approx 0.25$ ,  $j_{e_s} = 0.25eV_{e_s}(1 - \sigma_{e_s})k_{e_s}(B) \approx 6.2 \text{ нА/см}^2$ . Для ионов коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии  $\gamma_i \approx 0.016(h_i - 2\chi_W)$  [10, 20] ( $h_i$  – потенциал ионизации). Для ионов  $O^+$  и  $N^+$ , преобладающих на орбите  $h \approx 700 \text{ км}$  (максимум солнечной активности),  $j_i = 0.5eN_iU_\infty[1 + \operatorname{erf}\sqrt{e\Phi_W/(kT_{e_h})}]$  [9, 10, 20]. Зарядовое состояние поверхностей тела в полярной ионосфере в значительной степени определяется воздействием авроральных электронов с энергиями  $T_{e_h} \geq 10 \text{ кэВ}$  при концентрации  $N_{e_h} \approx 4 \text{ см}^{-3}$  [13, 30]. Плотность тока авроральных электронов на поверхность твёрдого тела в полярной ионосфере составляет  $j_{0e_h} \approx 1.07 \text{ нА/см}^2$  [26, 27, 31] или с учётом усреднённых по энергетическому спектру значений коэффициентов вторичной эмиссии  $\sigma_{e_h} \approx 0.6$  [1, 13]  $j_{e_h} \approx (1 - \sigma_{e_h})j_{0e_h} \approx 0.43 \text{ нА/см}^2$ . Влияние авроральных электронов с энергией  $T_{e_h} < 4 \text{ кэВ}$  пренебрежимо мало ( $j_{e_h} \leq 0.1 \text{ нА/см}^2$ ) [28]. Максимум плотности тока фотоэлектронов с поверхности стеклоуглерода по данным [17] (формула (1)) составляет  $j_v \approx 8.3 \text{ нА/см}^2$ . При максимуме солнечной активности [16, 37]  $j_v \approx$



**Рис. 6.** Временные вариации концентрации «холодных» электронов и потенциала поверхности зонда EZ: 1, 2 — концентрации во время летных испытаний 1 сентября 2011 г. (начало UT = 00 ч 23 мин 37 с) и 14 сентября 2011 г. (начало UT = 00 ч 57 мин 15 с), 3, 4 — соответствующие потенциалы поверхности

$\approx 6-8 \text{ нА/см}^2$ . С учётом оценок работы [15] значение плотности фототока с поверхности зонда EZ принято равным  $j_v \approx 7.5 \text{ нА/см}^2$ .

Рассчитанные с применением изложенной процедуры значения равновесного потенциала  $\Phi_W$  сферы, покрытой стеклоуглеродом (кружки и точки на рис. 6) согласуются с измеренными значениями — выходными сигналами зонда EZ (кривые 3, 4) в пределах погрешности  $\pm 1 \%$ . Соответствие измеренных и рассчитанных значений потенциала  $\Phi_W$  свидетельствует о корректности процедуры численного и физического моделирования зондовых измерений на КА «Сич-2» и о приемлемой точности определения параметров «холодных» электронов ( $T_e$  и  $N_e$ ) в околоспутниковой плазме на орбите.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана процедура численного и физического (стендового) моделирования зондовых измерений параметров околоспутниковой среды в полярной ионосфере на КА «Сич-2». Численно и экспериментально определены значения коэффициентов, характеризующих влияние возможностей околоспутниковой среды на выходные сигналы детектора нейтральных частиц DN и вольтамперные характеристики одиночного цилиндрического (DE) и сферического (EZ) зондов.

Соответствие расчётных и измеренных значений равновесного потенциала изолированной сферы (зонд EZ) свидетельствует о корректности процедуры моделирования зондовых измерений и приемлемой точности определения температуры и концентрации «холодных» электронов в околоспутниковой плазме на полярной орбите КА «Сич-2».

1. Акишин А. И., Новиков Л. С. Эмиссионные процессы при воздействии на материалы факторов космической среды // Космическая технология и материаловедение. — М.: Наука. 1982. — С. 85—95.
2. Альвен Г., Фельтхаммар К. Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967. — 260 с.
3. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. — М.: Наука, 1964. — 260 с.
4. Бакшт Ф. Г., Дюжев Г. А., Циркель Б. И. и др. Зондовая диагностика низкотемпературной плазмы в магнитном поле // Журн. технической физики. — 1977. — **47**, № 11. — С. 2269—2279.
5. Грановский В. А. Электрический ток в газе. — М.—Л.: Гостехиздат, 1952. — 543 с.
6. Губский В. Ф. Влияние магнитного поля на измерения концентрации и температуры электронов цилиндрическими зондами в ионосфере Земли // Солнечно-земная физика. — 2008. — **1**, вып. 12. — С. 261—269.
7. Гуревич А. В., Питаевский Л. П., Смирнова В. В. Ионосферная аэродинамика // Успехи физ. наук. — 1969. — **99**, № 1. — С. 3—49.
8. Девятов А. М., Мальков М. А. Диагностика плазмы в магнитном поле. Плоский зонд // Изв. вузов. Физика. — 1984. — № 3. — С. 29—34.
9. ECSS-E-10-04A. Параметры космического пространства. — Noordwijk: ESTEC, 2000. — 219 с.
10. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М: Атомиздат, 1969. — 291 с.
11. Котельников В. М. Вольтамперные характеристики цилиндрического зонда в потоке столкновительной и бесстолкновительной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2008. — **46**, № 3. — С. 342—347.
12. Москаленко А. М. К теории цилиндрического зонда // Космич. исследования. — 1979. — **17**, № 1. — С. 51—59.
13. Новиков Л. С., Милев В. А., Маклецов А. А. и др. Математическое моделирование электризации космических аппаратов // Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под. ред. Л. С. Новикова. — М.: КДУ, 2007. — С. 276—314.
14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
15. Смирнова В. В. К теории горячего зонда и фотозонда // Геомагнетизм и аэрономия. — 1966. — **6**, № 2. — С. 276—283.
16. Смирнова Н. Ф., Станев Г. Определение плотности фотоэлектронного тока на основе сопоставления измерения потенциала спутника «Интербол-2» относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 // Солнечно-земная физика. — 2008. — **1**, вып. 12. — С. 186—189.
17. Торкар К., Джезенски Г., Веселов М. В. и др. Измерение электрического потенциала спутника «Интербол-2» относительно плазмы и основанное на нём определение концентрации электронов // Космич. исследования. — 1999. — **37**, № 6. — С. 644—653.
18. Шувалов В. А. О точности вычисления плотности ионов при обтекании тел потоком разреженной плазмы // Геомагнетизм и аэрономия. — 1977. — **17**, № 6. — С. 1040—1043.
19. Шувалов В. А. Структура ближнего следа за цилиндром в потоке неравновесной разреженной плазме // Геомагнетизм и аэрономия. — 1980. — **20**, № 3. — С. 425—429.
20. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995. — 180 с.
21. Шувалов В. А., Зельдина Э. А. Влияние распределения плотности ионов на структуру электростатического поля в следе за спутниками // Геомагнетизм и аэрономия. — 1975. — **15**, № 4. — С. 627—632.
22. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Радиационная электризация подветренных поверхностей космических аппаратов авроральными электронами // Космич. исследования. — 2003. — **41**, № 4. — С. 438—448.
23. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Контактная диагностика высокоскоростных потоков разреженной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2005. — **43**, № 3. — С. 343—351.
24. Шувалов В. А., Лазученков Д. Н., Кочубей Г. С., Носиков С. В. Диагностика нейтрального и заряженного компонентов потока разреженной плазмы калориметрическими зондами // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — **53**, № 3. — С. 80.
25. Шувалов В. А., Токмак Н. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С. Синергетический эффект воздействия потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета на полиимидные пленки космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 10—19.
26. Anderson P. S. A Survey of Spacecraft Charging Events on the DMSP Spacecraft in LEO // Proc. 7-th Spacecraft Charging Technology Conf. 2001. ESA. Sp.476. — P. 331—336.

27. Anderson P. S., Koons H. C. A spacecraft charging anomaly on a DMSP satellite in a aurora // J. Spacecraft and Rockets. — 1996. — **33**, N 5. — P. 734—738.
28. Davies R. E., Dennison J. R. Evolution of secondary electron emission characteristics of spacecraft surfaces // J. Spacecraft and Rockets. — 1997. — **34**, N 4. — P. 571—574.
29. Godard R., Laframboise J. G. Total current to cylindrical collectors in collision less plasma // Planet. Space Sci. — 1983. — **31**, N 3. — P. 275—283.
30. Gussenhoven M. S., Hardy D. A., Rick F., et al. High-level charging in the low-altitude polar auroral environment // J. Geophys. Res. — 1985. — **90**. — P. 11009—11029.
31. Labramboise J. G., Luo J. High-voltage polar-orbit and beam-induced charging of a dielectric spacecraft: A Wake-induced barrier effect mechanism // J. Geophys. Res. — 1989. — **94A**, N 7. — P. 9033—9048.
32. Laframboise J. G. Theory of spherical and cylindrical Langmuir probes in a collisionless plasma at rest // Rarefied gas dynamics. — N.-Y.: Acad. Press, 1965. — Vol. 2. — P. 22—44.
33. Lebreton J. P., Stverak S., Travnicek P., et al. The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results // Planet. and Space Sci. — 2006. — **54**. — P. 472—487.
34. Makita H., Kuriki K. Current collection by spherical Langmuir probes drifting in a collisionless plasma // Phys. Fluids. — 1978. — **21**, N 8. — P. 1279—1286.
35. McDonald P., Smetana F. Results of a numerical experiment to determine the current collected by charged cylinder in a collisionless plasma stream // Rarefied gas dynamics. — N.-Y.: Acad. Press, 1969. — Vol. 2. — P. 1627—1636.
36. Parker L. W., Murphy B. L. Potential buildup on an electron – emitting ionosphere satellite // J. Geophys. Res. — 1967. — **72**, N 5.
37. Pedersen A., Cattell C. A., Falhammar C. G., et al. Quasi-static electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE Satellites // Space Sci. Revs. — 1984. — **37**. — P. 269—283.
38. Rubinstein J., Laframboise J. G. Theory of a spherical probe in a collisionless magnetoplasma // Phys. Fluids. — 1982. — **25**, N 7. — P. 1174—1182.

Надійшла до редакції 14.09.12

V. A. Shuvalov, V. E. Korepanov, A. A. Lukenyuk,  
N. A. Tokmak, G. S. Kochubey

#### MODELING OF PROBE MEASUREMENTS OF PLASMA ENVIRONMENT PARAMETERS ONBOARD THE SPACECRAFT «SICH-2»

We developed a procedure for the numerical and physical (set) modeling of the probe measurements of environment parameters for the spacecraft «Sich-2». A correlation between the calculated and measured values of the equilibrium potential of the insulated sphere (EZ probe) testifies that the modeling procedure is correct and the precision of the determination of electron temperature and plasma environment concentration in the polar orbit of the spacecraft «Sich-2» is acceptable.

Ю. В. Костюченко<sup>1</sup>, Д. М. Соловйов<sup>2</sup>, М. В. Ющенко<sup>1</sup>, С. С. Дугін<sup>1</sup>,  
І. М. Копачевський<sup>1</sup>, Ю. Г. Білоус<sup>1</sup>, І. Г. Артеменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

<sup>2</sup> Морський гідрофізичний інститут Національної академії наук України, Севастополь

## ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ НАЗЕМНИХ ПОЛІГОННИХ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ ДЗЗ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ГІДРОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Запропоновано теоретико-методичні засади інтеркалібрування даних супутниковых та польових досліджень спектральних властивостей земних покривів у задачах оцінки водного балансу та гідролого-гідрогеологічної безпеки територій. На основі аналізу даних вимірювань польового спектрорадіометра FieldSpec®3 FR визначено статистичні закономірності просторово-часового розподілу характеристик спектрального відбиття за спектральними індексами, що використовуються для вирішення задачі. Запропоновано форму оптимального алгоритму розрахунку спектральних індексів на основі кореляційного аналізу, а також загальний вигляд калібрувальних закономірностей для подальшої завірки даних супутниковых спостережень.

Спектри відбиття земних утворень, які реєструються за допомогою приладів супутникового базування, формуються шляхом інтеграції енергетичного внеску з великих ділянок поверхні. Дано особливість суттєво відрізняє їх від спектрів, отриманих шляхом наземних вимірювань, і має бути врахована у процесі порівняльного аналізу. На окремих вузьких спектральних смугах ці ефекти можуть бути не помітними. Але при аналізі суперпозицій спектральних смуг (спектральних індексів), особливо у випадку, коли ширина смуг є суттєвою, просторово-часова варіабельність енергетичного потоку з поверхні має бути врахована при зіставленні даних наземних та дистанційних вимірювань.

Баланс випромінювання ділянки земної поверхні  $R_n$  описується наступним рівнянням [9, 12]:

$$R_n(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}) = H(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}) + \\ + LH(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}, \Theta) + G(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}, \mathbf{T}, \Theta), \quad (1)$$

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, Д. М. СОЛОВЙОВ, М. В. ЮЩЕНКО,  
С. С. ДУГІН, І. М. КОПАЧЕВСЬКИЙ, Ю. Г. БІЛОУС,  
І. Г. АРТЕМЕНКО, 2012

де  $T_{aero}$  — аеродинамічна температура поверхні,  $LH$  — прихована теплота (залишок теплової енергії, що надійшла з випромінюванням, після поглинання рослинним покривом та ґрунтом), параметричні описи параметрів ґрунтів та рослинності ( $\mathbf{P}$ ), кількості опадів та сонячної радіації ( $\mathbf{W}$ ), поточного теплового ( $\mathbf{T}$ ) та гідрологічного ( $\Theta$ ) станів поверхні.

Варіації термальних і гідрологічних умов згідно з роботою [3] є функціями кількох змінних:

$$\frac{dT}{dt} = f(T_{aero}, \Theta, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{W}), \quad (2)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = f(LH, \Theta, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{W}). \quad (3)$$

З урахуванням вищепередованого загального опису та процесів випаровування з поверхні і евапотранспірації в роботі [4] було запропоновано таке рівняння для опису енергетичного потоку з ділянки поверхні:

$$g_T = f_v g_v + f_s g_s, \quad (4)$$

де  $f_v$  та  $f_s$  — частини досліджуваної ділянки, що переважно вкриті рослинністю або переважно

представлені оголеними ґрунтами. У найбільш загальному випадку, коли немає жодної наземної інформації про розподіл гідрогеологічних та геоморфологічних характеристик досліджуваної ділянки, згідно з [4] можна вважати, що  $f_v = 1 - f_s$ . Для більш коректного розрахунку  $f_v$  та  $f_s$  можна використати дані ДЗЗ [4]:

$$f_v = 1 - \left( \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^p, \quad (5)$$

$$f_s = g \cdot \left( \frac{NDWI - NDWI_{\min}}{NDWI_{\max} - NDWI_{\min}} \right)^q. \quad (6)$$

Тут максимальні та мінімальні значення індексів  $NDVI$  та  $NDWI$  розраховуються відповідно до стандартного алгоритму [8, 10] у межах визначеного інтервалу спостережень, а  $g$ ,  $p$  та  $q$  — емпіричні коефіцієнти.

Варіабельність енергетичного потоку може бути врахована двома шляхами: по-перше, введенням спеціального алгоритму розрахунку спектральних індексів, який враховував би особливості формування енергетичного балансу земної поверхні з огляду на задачу, що вирішується, і, по-друге, застосуванням статистичних процедур для аналізу даних наземних вимірювань з метою регуляризації сітки спостережень відносно супутниковых даних. Крім того, важливим є аналіз часової динаміки спостережень у випадках, коли проведення одночасних із супутниковими вимірювань на наземних полігонах не є можливим.

Зазначимо, що задача якісного і кількісного обґрунтування придатного для інтеркалібрування форми виразу розрахунку спектрального індексу в кожному окремому випадку потребує детального аналізу і обробки великої кількості лабораторних, наземних і супутниковых даних. При подальшому розгляді обмежимося аналізом лише нормалізованого вегетаційного індексу  $NDVI$  (Normalized Difference Vegetation Index) та нормалізованого водного індексу  $NDWI$  (Normalized Difference Water Index), як таких, що у найбільшій мірі відповідають характеру задачі про оцінку гідрологічної безпеки територій.

Класичні вирази для цих індексів, обґрунтовані лабораторними експериментами, запропо-

новано в роботі [10] для  $NDVI$  і [8] для  $NDWI$  у вигляді

$$NDVI^{lab} = \frac{r_{800} - r_{680}}{r_{800} + r_{680}}, \quad (7)$$

$$NDWI^{lab} = \frac{r_{857} - r_{1241}}{r_{857} + r_{1241}}. \quad (8)$$

Тут  $r_\lambda$  — коефіцієнт відбиття у відповідній смузі спостереження  $\lambda$  (нм).

Враховуючи те, що більшість спектрометрических приладів супутникового базування здійснюють зйомку у визначених спектральних смугах, а також зауваження щодо енергетичного балансу територій, які випливають із рівнянь (1)–(4), в роботі [11] було запропоновано рівняння для розрахунку наведених індексів для порівняння з даними конкретних супутниковых сенсорів:

$$NDVI^{MSS} = \\ = \frac{1}{g} \left( \int_{700}^{800} Id\lambda - \int_{600}^{700} Id\lambda \right) \Big/ \left( \int_{700}^{800} Id\lambda + \int_{600}^{700} Id\lambda \right). \quad (9)$$

Для даних, отриманих сенсором MSS супутників серії «Landsat» Геологічної служби США, а також для даних, отриманих сенсорами TM і ETM+ супутників «Landsat» запропоновано вирази

$$NDVI^{ETM} = \\ = \frac{1}{g} \left( \int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{630}^{690} Id\lambda \right) \Big/ \left( \int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{630}^{690} Id\lambda \right), \quad (10)$$

$$NDWI^{ETM} = \\ = \frac{1}{g} \left( \int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right) \Big/ \left( \int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right). \quad (11)$$

Застосування редукованих на спектральні інтервали рівнянь дозволяє отримати розподіл спектральних індексів, що відображають як специфіку використаних засобів зйомки, так і просторові варіації енергетичного балансу земної поверхні, і таким чином коректніше порівняти результати супутниковых і наземних спектрометрических вимірювань.

Регуляризація може бути проведена різними шляхами. В рамках задачі, що вирішується, можна запропонувати відносно простий шлях, що

базується на визначенні розподілів досліджува-  
них характеристик по всій території  $f_{x,y}$  відносно  
розподілів на вимірюваних ділянках  $f_m$  по аналогії  
з [7]:

$$f_{x,y} = \sum_{m=1}^n w_{x,y}(\tilde{f}_m) f_m, \quad (12)$$

де  $w_{x,y}(\tilde{f}_m)$  — ваговий коефіцієнт, який визна-  
чається через пошук мінімуму [5]:

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n \sum_{f_m \in F} w_{x,y}(\tilde{f}_m) \left( 1 - \frac{f_m}{\tilde{f}_m} \right)^2 \right\}. \quad (13)$$

Тут  $m$  — кількість точок, на яких проводилися  
вимірювання,  $n$  — кількість серій спостережень,  
 $f_m$  — розподіл результатів вимірювань (дані ек-  
спериментів),  $F$  — множина (загальна сукупність)  
даних вимірювань,  $\tilde{f}_m$  — середній розподіл зна-  
чень вимірюваних характеристик.

Застосування процедури регуляризації дозво-  
ляє отримати розподіли вимірюваних характе-  
ристик, що з контролюваною точністю відпо-  
відають просторово-часовим параметрам супут-  
никової зйомки. Зіставлення двох регулярних  
мереж спостереження — наземної та супутнико-  
вої зйомки — можна провести, використовуючи  
підхід [1] відповідно до рівняння

$$\bar{R} = \int R(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (14)$$

Тут  $\mathbf{r}$  — двовимірний вектор координат ділянки,  
 $R$  — вимірюваний розподіл спектрального відбиття  
( $\bar{R}$  — з гіршим просторовим розрізненням).

Таким чином можуть бути коректно зіставлені  
дані наземних та дистанційних вимірювань.

Для калібрування отриманих спектральних ін-  
дексів було проведено наземні спектрометричні  
польові вимірювання. За допомогою польового  
спектрорадіометра FieldSpec®3 FR [2] на окре-  
мих ділянках досліджуваного регіону у періоди,  
що відповідають періодам супутникових спо-  
стережень, зроблено 117 вимірювань спектральної  
відбивної здатності земних покривів у діапазоні  
350—2500 нм з інтервалом відліку 1.4 нм у діа-  
пазоні довжини хвиль 350—1000 нм та 2.0 нм у  
діапазоні довжини хвиль 1000—2500 нм при  
спектральній розрізненості (повній ширині на  
половині максимуму): 3.0 нм при 700 нм і 10 нм —  
при 1400 та 2100 нм.

Для проведення проблемно-орієнтованої класи-  
фікації та подальшого аналізу спектральних  
характеристик земних покривів використову-  
валися матеріали космічних зйомок супутників  
«Landsat» (Геологічна служба США): «Landsat-2»,  
сенсор MSS (зйомки від 11.06.1975 р., 19.03, 12.05  
та 24.06.1976 р.); «Landsat-5», сенсор TM (зйом-  
ки від 04.05, 07.07.1986 р., 22.07.2003 р., 28.04,  
14.05, 15.06.2007 р.); «Landsat-7», сенсор ETM+  
(зйомки від 19.07.1999 р., 28.02, 02.05.2000 р.,  
24.03, 27.05.2003 р., 22.05, 09.07, 17.07.2007 р.,  
09.04, 25.04, 27.05, 28.06 та 14.07.2009 р.). У про-  
цесі аналізу супутниковых даних використовува-  
лися картографічні матеріали актуалізації 1972 та  
1986 рр., а також матеріали наземних польових  
досліджень ЦАКДЗ 2007—2010 рр.

Пряме зіставлення даних вимірювань спектральних  
характеристик земних покровів і роз-  
рахованих на їхній основі спектральних індексів  
земних утворень не показує сталої статистично  
достовірної кореляційної залежності між розподілами  
даних супутникового і наземного поход-  
ження по всьому інтервалу спостережень.

Розподіли даних, які демонструють на окре-  
мих інтервалах сталі кореляції певних па-  
раметрів, можна отримати шляхом регуляризації по  
енергетичному потоку (див. табл. 1).

Як випливає з наведених даних, найкраща  
кореляція спостерігається між даними супутни-  
кових спостережень і наземних вимірювань, об-  
рахованих за алгоритмом «ETM» (10), (11), трохи  
гірша — при використанні алгоритму «MSS» (9).  
Важливо зазначити задовільні показники коре-  
ляцій, що спостерігаються між значеннями, об-  
рахованими за традиційним «lab»-алгоритмом та  
всіма даними спостережень, що підтверджує ко-  
ректність запропонованих алгоритмів (9)—(11).

Застосування алгоритмів подальшої просто-  
рово-часової регуляризації і корекції дозволяє  
отримати кращі кореляції через врахування про-  
сторових варіацій розподілів вимірюваних ха-  
рактеристик та різниці просторових характеристи-  
к супутникових та наземних вимірювань (табл. 2).

За цими даними можна розрахувати рівняння  
лінійної апроксимації, що пов'язують значення  
спектральних індексів, отриманих за даними  
супутникових та наземних вимірювань із засто-

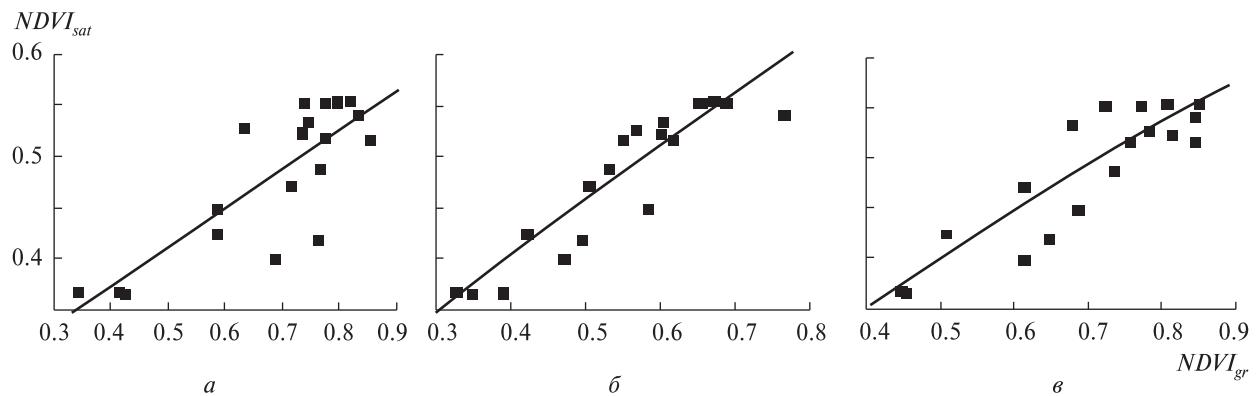
**Таблиця 1.** Коефіцієнти кореляції  $r$  між значеннями індексів  $NDVI$  за даними супутниковых спостережень 2007 і 2009 рр. та польових вимірювань 2010 і 2011 рр., розраховані за допомогою алгоритмів «lab», «MSS», «ETM» із застосуванням процедур спектральної регуляризації (6)–(10) без просторово-часової регуляризації і взаємної корекції (12)–(14)

Параметр	Індекс	$NDVI_{sat}^{2007}$	$NDVI_{sat}^{2009}$	$NDVI_{gr}^{lab(2010)}$	$NDVI_{gr}^{lab(2011)}$	$NDVI_{gr}^{MSS(2010)}$	$NDVI_{gr}^{MSS(2011)}$	$NDVI_{gr}^{ETM(2010)}$	$NDVI_{gr}^{ETM(2011)}$
$r$	$NDVI_{sat}^{2007}$	1	0.66396	0.31829	0.55991	0.44642	0.35797	0.48196	0.62964
$\sigma$			0.00194	0.2892	0.0466	0.12622	0.22978	0.09535	0.0211
$r$	$NDVI_{sat}^{2009}$	0.66396	1	0.03692	0.62964	0.40067	0.59742	0.37523	0.65962
$\sigma$		0.00194		0.90468	0.0211	0.17486	0.03108	0.20645	0.01417
$r$	$NDVI_{gr}^{lab(2010)}$	0.31829	0.03692	1	0.72415	0.7366	0.79333	0.71868	0.44383
$\sigma$		0.2892	0.90468		0.06573	0.00408	0.03325	0.00564	0.31849
$r$	$NDVI_{gr}^{lab(2011)}$	0.55991	0.62964	0.72415	1	0.74703	0.86091	0.66985	0.88956
$\sigma$		0.0466	0.0211	0.06573		0.05365	0.00016	0.09971	0.00005
$r$	$NDVI_{gr}^{MSS(2010)}$	0.44642	0.40067	0.7366	0.74703	1	0.75825	0.88444	0.48203
$\sigma$		0.12622	0.17486	0.00408	0.05365		0.04821	0.00006	0.27334
$r$	$NDVI_{gr}^{MSS(2011)}$	0.35797	0.59742	0.79333	0.86091	0.75825	1	0.65699	0.68958
$\sigma$		0.22978	0.03108	0.03325	0.00016	0.04821		0.10886	0.00911
$r$	$NDVI_{gr}^{ETM(2010)}$	0.48196	0.37523	0.71868	0.66985	0.88444	0.10886	1	0.54243
$\sigma$		0.09535	0.20645	0.00564	0.09971	0.00006	0.10886		0.2084
$r$	$NDVI_{gr}^{ETM(2011)}$	0.62964	0.65962	0.44383	0.88956	0.48203	0.68958	0.54243	1
$\sigma$		0.0211	0.01417	0.31849	0.00005	0.27334	0.00911	0.2084	

Примітка:  $\sigma$  — середнє квадратичне відхилення.

**Таблиця 2.** Коефіцієнти кореляції між значеннями індексів  $NDVI$  за даними супутниковых спостережень 2007 і 2009 рр. та польових вимірювань, розраховані за допомогою різних алгоритмів після застосування процедур спектральної і просторово-часової регуляризації і корекції (7)–(14) (за результатами вимірювань 2009 і 2010 рр.)

Параметр	Індекс	$NDVI_{sat}^{2007}$	$NDVI_{sat}^{2009}$	$NDVI_{sat}^{mean}$	$NDVI_{gr}^{lab}$	$NDVI_{gr}^{MSS}$	$NDVI_{gr}^{ETM}$
$r$	$NDVI_{sat}^{2007}$	1	0.66396	0.94734	0.7593	0.93672	0.8628
$\sigma$			0.66396	7.8308E-10	1.63046E-4	3.59965E-9	1.99942E-6
$r$	$NDVI_{sat}^{2009}$	0.66396	1	0.86844	0.7236	0.69255	0.7713
$\sigma$		0.66396		1.42697E-6	4.621E-4	0.69255	1.10376E-4
$r$	$NDVI_{sat}^{mean}$	0.94734	0.86844	1	0.8133	0.91766	0.90241
$\sigma$		7.8308E-10	1.42697E-6		2.29455E-5	3.15877E-8	1.26972E-7
$r$	$NDVI_{gr}^{lab}$	0.7593	0.7236	0.8133	1	0.8365	0.86659
$\sigma$		1.63046E-4	4.621E-4	2.29455E-5		8.07675E-6	1.59629E-6
$r$	$NDVI_{gr}^{MSS}$	0.93672	0.69255	0.91766	0.8365	1	0.91913
$\sigma$		3.59965E-9	0.69255	3.15877E-8	8.07675E-6		2.72411E-8
$r$	$NDVI_{gr}^{ETM}$	0.8628	0.7713	0.90241	0.86659	0.91913	1
$\sigma$		1.99942E-6	1.10376E-4	1.26972E-7	1.59629E-6	2.72411E-8	



**Рис. 1.** Корелятивні залежності індексів  $NDVI$ , отриманих за даними супутниковых та наземних вимірювань: *a* — алгоритм «*lab*» (7) (коефіцієнт кореляції  $r = 0.81$ ; середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 0.042$ ); *б* — алгоритм «*MSS*» (9) ( $r = 0.91$ ,  $\sigma = 0.029$ ); *в* — алгоритм «*ETM*» (10) ( $r = 0.90$ ,  $\sigma = 0.031$ )

суванням різних алгоритмів. Ці залежності представлено на рис. 1.

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутникових спостережень значеннями  $NDVI_{sat}$  і значеннями  $NDVI_{gr}^{lab}$ , розрахованими за результатами польових спектрометричних досліджень за алгоритмом (7), для випадку, наведеного на рис. 1, *a*, має вигляд

$$NDVI_{sat} = 0.22 + 0.38 \cdot NDVI_{gr}^{lab}. \quad (15)$$

Рівняння (15) може розглядатися як калібрувальна залежність для  $NDVI_{gr}^{lab}$ .

Відповідні калібрувальні залежності для  $NDVI^{MSS}$  і  $NDVI^{ETM}$ , отримані за допомогою алгоритмів (9) та (10) (див. рис. 1, *б* і *в*), мають вигляд

$$NDVI_{sat} = 0.19 + 0.55 \cdot NDVI_{gr}^{MSS}. \quad (16)$$

$$NDVI_{sat} = 0.17 + 0.45 \cdot NDVI_{gr}^{ETM}. \quad (17)$$

Отримані калібрувальні залежності (15)–(17) демонструють достатньо високу кореляцію показників. Загальний порівняльний аналіз показників кореляції дозволяє визначити найбільш

**Таблиця 3.** Коефіцієнти кореляції між значеннями індексів  $NDWI$  за даними супутниковых спостережень 1986 і 2003 рр. та польових вимірювань 2010 і 2011 рр., розрахованих за допомогою різних алгоритмів із застосуванням процедур спектральної регуляризації (11) без просторово-часової регуляризації і взаємної корекції (12)–(14)

Пара-метр	Індекс	$NDWI_{sat}^{1986}$	$NDWI_{sat}^{2003}$	$NDWI_{gr}^{lab(2010)}$	$NDWI_{gr}^{lab(2011)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(2010)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(2011)}$
$r$	$NDWI_{sat}^{1986}$	1	0.63986	0.66195	0.41385	0.6239	0.78275
$\sigma$			0.00317	0.01371	0.15979	0.02268	0.00156
$r$	$NDWI_{sat}^{2003}$	0.63986	1	0.48938	0.68942	0.71075	0.90453
$\sigma$		0.00317		0.08964	0.00913	0.00647	0.000022
$r$	$NDWI_{gr}^{lab(2010)}$	0.66195	0.48938	1	0.85971	0.92433	0.61967
$\sigma$		0.01371	0.08964		0.08292	0.000006	0.13775
$r$	$NDWI_{gr}^{lab(2011)}$	0.41385	0.68942	0.85971	1	0.42932	0.69317
$\sigma$		0.15979	0.00913	0.08292		0.33643	0.00861
$r$	$NDWI_{gr}^{ETM(2010)}$	0.6239	0.71075	0.92433	0.42932	1	0.81637
$\sigma$		0.02268	0.00647	0.000006	0.33643		0.02507
$r$	$NDWI_{gr}^{ETM(2011)}$	0.78275	0.90453	0.61967	0.69317	0.81637	1
$\sigma$		0.00156	0.000022	0.13775	0.00861	0.02507	

статистично коректні процедури калібрування даних (див. табл. 2).

Таким чином, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу  $NDVI$  за даними польових спектрометрических вимірювань за допомогою приладу FieldSpec®3 FR слід визнати рівняння (10), а для верифікації даних супутниковых зйомок при цьому можна запропонувати калібрувальну залежність (17).

Аналогічним чином можна проаналізувати розподіли спектральних індексів  $NDWI$ .

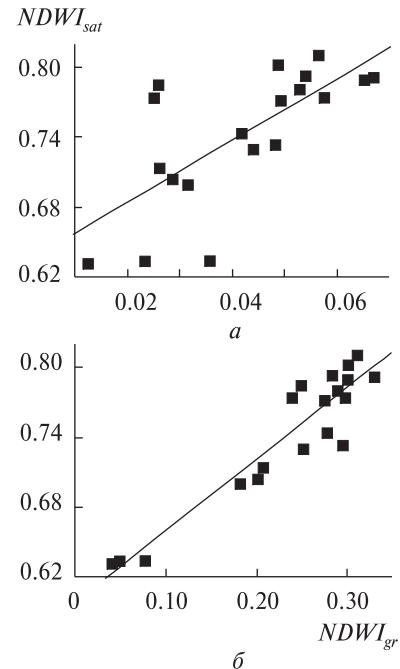
Як і у випадку із вегетаційними індексами, регуляризація за енергетичним потоком (спектральна регуляризація) дозволяє отримати розподіли даних, які демонструють на окремих інтервалах сталі кореляції певних параметрів (див. табл. 3).

Слід зазначити, що «водні» індекси  $NDWI$  демонструють кращі кореляції, ніж вегетаційні індекси, але просторовий розподіл їхніх вимірювань значно гірший, що пов'язано з недосконалістю методики наземних вимірювань. Застосування алгоритмів подальшої просторово-часової регуляризації і корекції дозволяє отримати ще кращі кореляції через врахування просторових варіацій розподілів вимірюваних характеристик та різниці просторових характеристик супутниковых та наземних вимірювань.

Отримані дані демонструють добре кореляції (див. табл. 4), і за ними можна розрахувати рівняння лінійної апроксимації, що пов'язують

**Таблиця 4. Коефіцієнти кореляції між розподілами індексів  $NDWI$  за даними супутниковых спостережень 2003 р. та польових вимірювань, розрахованих за допомогою різних алгоритмів після застосування процедури спектральної та просторово-часової регуляризації і корекції (11)–(14) (за результатами вимірювань 2009 і 2010 рр.)**

Параметр	Індекс	$NDWI_{sat}^{2003}$	$NDWI_{gr}^{lab(mean)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(mean)}$
$r$	$NDWI_{sat}^{2003}$	1	0.70408	0.9377
$\sigma$			0.00076	0.000000003
$r$	$NDWI_{gr}^{lab(mean)}$	0.70408	1	0.78745
$\sigma$		0.00076		0.000063
$r$	$NDWI_{gr}^{ETM(mean)}$	0.9377	0.78745	1
$\sigma$		0.00000003	0.000063	



**Рис. 2.** Корелятивні залежності індексів  $NDWI$ , отриманих за даними супутниковых та наземних вимірювань: *a* – алгоритм «lab» (8) ( $r = 0.70$ ,  $\sigma = 0.043$ ), *b* – алгоритм «ETM» (11) ( $r = 0.94$ ,  $\sigma = 0.021$ )

значення спектральних індексів, отриманих за даними супутниковых та наземних вимірювань із застосуванням різних алгоритмів.

Отримані залежності представлено на рис. 2.

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутниковых спостережень значеннями індексу  $NDWI$  і значеннями, розрахованими за результатами польових спектрометрических досліджень за алгоритмом (8), для наведеного на рис. 2, *a* випадку може бути представлено як:

$$NDWI_{sat} = 0.65 + 2.75 \cdot NDWI_{gr}^{lab}. \quad (18)$$

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутниковых спостережень значеннями індексу  $NDWI$  і значеннями, розрахованими за результатами польових спектрометрических досліджень за алгоритмом (11), для наведеного на рис. 2, *b* випадку має вигляд

$$NDWI_{sat} = 0.58 + 0.61 \cdot NDWI_{gr}^{ETM}. \quad (19)$$

Враховуючи те, що дані супутника було відкалибровано з коефіцієнтом  $+0.5$  відносно початкового розподілу (з метою детальнішого вивчення ділянок з малим значенням  $NDWI$ ), формулу (19) можна представити у вигляді

$$NDWI_{sat} = 0.29 + 0.61 \cdot NDWI_{gr}^{ETM}. \quad (20)$$

Загальний порівняльний аналіз показників кореляції індексів  $NDWI$  дозволяє визначити найбільш статистично коректні процедури калібрування даних (див. табл. 4).

Таким чином, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу  $NDWI$  за даними польових спектрометричних вимірювань за допомогою приладу FieldSpec®3 FR слід визнати рівняння (11), а як калібрувальну залежність для верифікації даних супутникових зйомок при цьому можна запропонувати рівняння (20).

Підсумовуючи, можна сказати, що в рамках проведеної роботи наведено теоретичні засади інтеркалібрування даних супутниковых та польових досліджень спектральних властивостей земних покривів, показано можливість використання даних польового спектрорадіометра FieldSpec®3 FR для завірки даних супутниковых спостережень в задачах оцінки водного балансу та гідролого-гідрогеологічної безпеки, наведено рівняння розрахунку спектральних індексів за даними польових вимірювань для проведення калібрування супутниковых спостережень. Таким чином, за окремими спектральними індексами було завірено дані  $NDVI$  та відкалибровано дані  $NDWI$ .

Слід зауважити, що під час проведення спектрометричних вимірювань за лімбічною схемою (під певним кутом до об'єкта) деякі ділянки області огляду спектрометра виявляються екранованими рослинністю. Якщо ділянка, на якій проводяться вимірювання, не є ізотропною, загальний спектральний відгук від ділянки може відрізнятися від відгуку від тієї ж ділянки, отриманого за «надірною» схемою (яка використовується при супутниковому спостереженні). Для врахування цього ефекту потрібно знати значення кутів зйомки  $i$ , крім того, мати загальний вигляд функції розподілу кутів огляду спектрометру за всіма ділянками, на яких проводилися вимірювання.

Враховуючи загальну неоднорідність умов досліджуваного району у межах розмірів ділянок зйомок, можна передбачити, що врахування ефекту впливу схеми спостереження дасть змогу зменшити невизначеність оцінювання спектральних індексів у середньому на 12–15 %. Таким чином, під час наступних робіт доцільно визначати в явному вигляді розподіл кутів польової спектрометричної зйомки  $p_m(\theta_i)$ , де  $\theta$  — кут огляду спектрометра,  $m$  — ділянки, на яких проводяться вимірювання, а  $i$  — точки вимірювань, у вигляді функції  $p_m(\theta_i) \rightarrow \mathbf{F}(\alpha(t), x_i, y_i, z_i, z^*_i)$ , де  $\alpha$  — кут Сонця,  $t$  — час вимірювання,  $x, y$  — горизонтальні координати точки вимірювання,  $z$  — рельєф місцевості,  $z^*$  — «ефективна висота рослинності» (положення спектрометра на місцевості відносно поверхні рослинного покриву). Це допоможе коректно визначити і врахувати похибки калібрувальних коефіцієнтів, пов'язані із різницею експозицій надірних і лімбічних зйомок.

Також слід зазначити, що визначені лінійні калібрувальні залежності для вегетаційного індексу  $NDVI$  (15)–(17) слід вважати достатньо коректними лише в інтервалі значень індексу 0.4–0.55. При  $NDVI > 0.55$  калібрувальні залежності не буде лінійною, як це демонструють дані рис. 1. Визначення точного виду калібрувальних залежностей для всього інтервалу можливих значень індексів є предметом подальших досліджень.

Таким чином, ми отримуємо інструмент для кількісного калібрування не тільки розподілів даних супутникового спостереження, але і спектральних індексів, що використовуються для аналізу параметрів гідролого-гідрогеологічної безпеки.

1. Acarreta J. R., Stammes P. Calibration comparison between SCIAMACHY and MERIS onboard ENVISAT // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. — 2005. — 2. — P. 31–35.
2. ASD FieldSpec®3 FR User Manual — Boulder: ASD Document, 2007. — 96 p.
3. Castelli F., Entekhabi D., Caporali E. Estimation of surface heat flux and an index of soil moisture using adjointstate surface energy balance // Water Resour. Res. — 1999. — 35. — P. 3115–3125.
4. Choudhury B. J., Ahmed N. U., Idso S. B., et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices

- studied by model simulations // *Remote Sens. Environ.* — 1994. — **50**. — P. 1—17.
5. *Cowpertwait P. S. P.* A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process // *Proc. Roy. Soc. London A.* — 1995. — **450**. — P. 163—175.
6. *Cox D. R., Hinkley D. V.* *Theoretical Statistics.* — NY: Chapman & Hall, 1974. — 285 p.
7. *Fowler H. J., Kilsby C. G., O'Connell P. E.* Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience and vulnerability of a water resource system // *Water Resour. Res.* — 2003. — **39**. — P. 1222; doi: 10.1029/2002WR001778.
8. *Gao B. C.* Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Proc. SPIE.* — 1995. — **2480**. — P. 225—236.
9. *Gupta H. V., Bastidas L. A., Sorooshian S., et al.* Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104**. — P. 19,491—19,503.
10. *Jackson R. D., Slater P. N., Pinter P. J.* Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres // *Remote Sens. Environ.* — 1983. — **15**. — P. 187—208.
11. *Kostyuchenko Yu. V., Kopachevsky I. M., Solovyov D. M., et al.* Way to reduce the uncertainties on ecological consequences assessment of technological disasters using satellite observations // *Proc. of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Reliable Engineering Computing «Robust Design — Coping with Hazards, Risk and Uncertainty», March 3—5, 2010, Singapore.* — Singapore: National University of Singapore, 2010. — P. 765—776.
12. *Peters-Lidard C. D., Zion M. S., Wood E. F.* A soil — vegetation — atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 4303—4324.

Національна Академія наук України

*Yu. V. Kostyuchenko, D. M. Solovyov, M. V. Yushchenko,  
S. S. Dugin, I. M. Kopachevsky, Yu. H. Bilous,  
I. G. Artemenko*

#### THE USE OF RESULTS OF GROUND-BASED TEST SITE SPECTROMETRIC MEASUREMENTS FOR THE CALIBRATION OF SATELLITE OBSERVATIONS TO ESTIMATE HYDROLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SECURITY

We propose some theoretical and methodological principles for intercalibration of satellite data and in-field spectrometric measurements in the framework of water balance and hydrological and hydro-geological security assessment. On the basis of the analysis of ground test sites spectrometric data of Field-Spec ® 3 FR, the statistical regularities of spatial-temporal distribution of spectral reflectance characteristics are determined for the spectral indices used in this study. An algorithm is proposed to calculate spectral indices using the correlation analysis. The general form of calibration patterns for further verification of satellite observations is given.

А. В. Дудник<sup>1</sup>, М. Прето<sup>2</sup>, Е. В. Курбатов<sup>1</sup>, С. Санчез<sup>2</sup>, Т. Г. Тимакова<sup>1</sup>, К. Г. Титов<sup>1</sup>, П. Парра<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

<sup>2</sup>Група космічних досліджень, Університет м. Алкала, Алкала де Енарес, Іспанія

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОНОВ И ЯДЕР ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ОТКРЫТОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

---

Представлено концепцію побудови малогабаритного бортового пристроя SIDRA для вимірювань потоків енергійних заряджених частинок у космічному просторі і перші результати лабораторних тестів окремих модулів пристроя. Обґрунтовано необхідність розробки такого типу спектрометра і наведено перелік актуальних завдань, що вирішуються за його допомогою. Представлено структурну схему, дається опис модулів і вузлів пристроя SIDRA. Обговорюються результати комп'ютерного моделювання, вимірювань основних характеристик перетворювачів заряду в напрягу, формувачів і пристрій вибірки і зберігання сигналів; тестувань лабораторного макету на електромагнітну сумісність і за допомогою прискорювача заряджених частинок. Описуються особливості програмного забезпечення прототипу модуля цифрової обробки сигналів, а також режими роботи пристроя.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления длительных космических миссий необходимы точные знания о распределении естественной радиации в окружающем пространстве. Бортовые системы жизнеобеспечения спутников могут давать сбои в своей работе или выходить из строя под воздействием повышенных потоков легких или тяжелых ядер высоких энергий. В случае, если такие спутники имеют на своем борту сенсоры, адекватно отражающие изменения радиационной обстановки, причина сбоев может быть идентифицирована. К примеру, мониторы, установленные на борту спутников SCATHA, «Voyager I» и CRRES, помогли идентифицировать причины сбоев в работе аппаратуры, сброса первичного питания при его подаче на полезную нагрузку [1, 2, 15]. Несмотря на многолетние масштабные усилия создателей космической аппаратуры, направленные на разработку всевозможных методов защиты электронного и оптического

оборудования от вредного воздействия корпускулярной радиации, время от времени поступают сведения о выходе из строя того или иного модуля, устройства или системы космического аппарата. Так, в результате мощной солнечной вспышки балла X5.4 в рентгеновском диапазоне по данным спутника GOES15, произошедшей в 04.02UT 7 марта 2012 г., и серии более мелких предшествующих и последующих вспышек, из короны Солнца в межпланетное пространство были сброшены огромные облака намагниченной плазмы. Европейский космический зонд «Венера-Экспресс», находящийся на орбите Венеры, гораздо ближе к Солнцу, чем Земля, был в этот день подвержен воздействию радиации. Звездные датчики, помогающие зонду определить свою позицию и ориентацию в пространстве, были «ослеплены». Команда управления полетом Европейского космического агентства приняла решение временно вывести датчики из эксплуатации и поддерживать ориентацию зонда с использованием гироскопов.

В настоящее время новые детектирующие системы для регистрации потоков заряженных частиц развиваются быстрыми темпами. Вы-

2. Дудник А. В., Подгурски П., Сильвестер Я. и др. Рентгеновский спектрофотометр SpinX и спектрометр частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОННАС-ФОТОН – предварительные результаты совместного анализа данных // Астрон. вестник. — 2012. — **46**, № 2. — С. 173–183.
3. Саркисян Л. А., Кирьянов Е. Ф., Воробьев Ю. А. Модернизация стодвадцатисантиметрового циклотрона // Приборы и техника эксперимента. — 1979. — № 1. — С. 19–21.
4. Юрлов В. Н., Котов Ю. Д., Гляненко А. С. и др. Научная аппаратура «Солнечный монитор» для исследования радиационного состояния околоземного космического пространства // Ядерная физика и инжиниринг. — 2011. — **2**, № 4. — С. 314–319.
5. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4-a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. A — 2003. — **506**, N 3. — P. 250–303.
6. Dotsenko O. V., Dudnik O. V., Meziat D., Prieto M. Concept of application of the SIDRA instrument to ensure safe operation of a satellite // 9<sup>th</sup> Ukrainian Conference on space research, Abstracts. — 2009. — P. 76.
7. Dudnik O. V., Bilogub V. V., Kurbatov E. V., et al. Compact on-board instrument SIDRA for measurement of particle fluxes & dose rates – concept and first model // 9<sup>th</sup> Ukrainian Conference on space research. Abstracts. — 2009. — P. 78.
8. Dudnik O. V., Meziat D., Prieto M. The concept of compact on-board instrument for measurements of particle fluxes & dose rates // Scientific Session MEPHI-2009: Abstracts. — 2009. — **2**. — P. 151 (in Russian).
9. Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V., et al. First concept of compact instrument SIDRA for measurements of particle fluxes in the space // J. Kharkiv University. Phys. Ser. «Nuclei, Particles, Fields». — 2011. — **969**, N 3(51). — P. 62–66.
10. Koons H. C., Gorney D. J. Relationship between electrostatic discharges on spacecraft P78-2 and the electron environment // J. Spacecraft Rockets. — 1991. — **28**, N 6. — P. 683–688.
11. Leung P., Whittlesey A. C., Garrett H. B., Robinson P. A. Environment-induced electrostatic discharges as the cause of Voyager I power-on resets // J. Spacecraft Rockets. — 1986. — **28**, N 3. — P. 323–330.
12. Prieto M., Guzman D., Garcia J. I., et al. Control Unit of the SIDRA Scientific Instrument // Proc. of 9<sup>th</sup> Conference «Jornadas de Computacion Reconfigurable y Aplicaciones», Alcala de Henares, Spain. — 2009. — P. 475–484.
13. Renker D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2006. — **567**, N 1. — P. 48–56.
14. Vacheret A., Barker G. J., Dziewiecki M., et al. Characterization and simulation of the response of Multi-Pixel Photon Counters to low light levels // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2011. — **656**, N 1. — P. 69–83.
15. Violet M. D., Frederickson A. R. Spacecraft anomalies on the CRRES satellite correlated with the environment and insulator samples // IEEE Trans. Nucl. Sci. — Dec. 1993. — **40**, N 6. — P. 1512–1519.

*Надійшла до редакції 21.06.12*

*O. V. Dudnik, M. Prieto, E. V. Kurbatov, S. Sanchez, T. G. Timakova, K. G. Titov, P. Parra*

#### **A SMALL-SIZED DEVICE FOR MONITORING OF HIGH-ENERGY ELECTRONS AND NUCLEI IN THE OUTER SPACE**

We present the concept of the compact on-board device SIDRA for measurements of energetic charged particle fluxes in the outer space and first results of laboratory tests for separate instrument's units. The necessity to elaborate the spectrometer of such a type is substantiated and some actual problems to be solved with the use of the device are listed. The block diagram is presented and the modules and components of the device SIDRA are described. We discuss some results of computer simulation, of measurements for the basic characteristics of charge-to-voltage converters, shapers, and sample and hold apparatus. Some results of tests for electromagnetic compatibility with other payload and with the help of charge particle accelerator are also considered. The features of the software for the digital processing module prototype as well as the device operation modes are described.

**В. В. Хижняк<sup>1</sup>, В. П. Деденок<sup>2</sup>, А. А. Ткаченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Український науково-дослідний інститут цивільного захисту Міністерства надзвичайних ситуацій України, Київ

<sup>2</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА ГАИТИ ( $M = 7.2$ ) И В ЯПОНИИ ( $M = 9.0$ ) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*На основі оцінок іоносферних затримок супутникових навігаційних радіосигналів за даними мережі станцій системи IGS проведено аналіз іоносферних варіацій над епіцентраторами двох сильних землетрусів на Гаїті в січні 2010 р. ( $M = 7.2$ ) і в Японії у березні 2011 р. ( $M = 9.0$ ). Виявлено характерні особливості змін стану локальної епіцентральної області іоносфери, спільні для підготовчого періоду обох землетрусів.*

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения на Гаити в январе 2010 г. ( $M = 7.2$ ) и в Японии в марте 2011 г. ( $M = 9.0$ ) стали одними из наиболее сильных землетрясений последнего времени. Они повлекли за собой значительные человеческие жертвы и разрушения. Катастрофические последствия сильных землетрясений делают исключительно актуальными исследования по выявлению предвестников таких сейсмических событий. Одним из направлений развития методов прогнозирования является изучение сейсмо-ионосферных эффектов [8], в частности тех, которые могут быть ассоциированы с подготовкой землетрясений. Исследователи отмечают, что часто в период от нескольких часов до нескольких суток до землетрясения в эпицентralной области ионосферы регистрируются аномалии, которые проявляются как специфические изменения либо полного содержания электронов в вертикальном столбе единичного сечения (VTEC) [5, 7, 9–13], либо максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы [2, 3, 6].

Выявление локальных ионосферных аномалий, ассоциированных с землетрясениями, за-

частую затруднено, поскольку ионосферные возмущения могут вызываться многими факторами, основными из которых являются солнечная активность и состояние магнитосферы Земли — факторы глобального влияния на ионосферу. Возмущения от этих факторов могут быть сильнее возмущений, связанных с тектоническими процессами и скрывать их. Так, например, в исследовании [1] не удалось выявить сейсмоионосферные предвестники землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 г. в Калифорнии ( $M = 7.1$ ) на фоне относительно высокой солнечной и геомагнитной активности.

Для преодоления таких трудностей в работе [6] предложен подход, позволяющий при возмущенной геомагнитной обстановке разделить сейсмические и геомагнитные эффекты воздействия на ионосферу. Для этого предложено использовать сравнительный анализ данных о состоянии ионосферы в эпицентralной и в удаленной от эпицентра (фоновой) областях. Такой подход позволил выделить локальные ионосферные аномалии в районе эпицентра землетрясения Hector Mine, которые не связаны с геомагнитной обстановкой и могут быть ассоциированы с эффектами сейсмического происхождения.

Поведение ионосферы перед землетрясениями на Гаити и в Японии исследовано в ряде ра-

бот. В работе [12] авторы на основе анализа глобальных ионосферных карт показали наличие ионосферных возмущений в эпицентральной области землетрясения на Гаити за несколько суток до события. В работе [9] авторы рассматривали только очень короткий (несколько часов до и после землетрясения) временной интервал, показав наличие ионосферной аномалии непосредственно (десятки минут) перед землетрясением. Методики, использованные в работах [9, 12], хоть и позволяют показать наличие ионосферного отклика на тектоническую активность, не могут быть использованы для сколько-нибудь заблаговременного предсказания, поскольку требуют либо наличия ионосферных карт, которые формируются с задержкой в несколько суток, либо рассчитаны на обработку данных после землетрясения.

При обработке измерений глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) одним из основных источников погрешности измерения псевдодальности является ионосферная задержка навигационного радиосигнала, которая однозначно связана с полным электронным содержанием ионосферы вдоль трассы «спутник — приемник» и может быть оценена из двухчастотных ГНСС-измерений. Так как эта задержка однозначно связана с VTEC, в работе [4] предложена методика оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы на основе оценки ионосферной задержки навигационного радиосигнала вдоль вертикального луча, приведенной к единицам длины ( $\Delta I_v$ ). Эта методика позволяет организовать непрерывный мониторинг и выявления неоднородностей ионосферы путем «сканирования» достаточно большого региона ионосферы ограниченным числом ГНСС-станций.

Целью работы является анализ вариаций в локальной эпицентральной области ионосферы в подготовительный период двух сильных землетрясений на основе методики оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы на основе оценок  $\Delta I_v$  по данным сети ГНСС-станций [4]. Для оценки влияния факторов глобального воздействия на ионосферу авторы использовали подход, пред-

ложенный в работе [6], при котором одновременно исследуются эпицентральная и фоновая области ионосферы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные о времени, мощности и координатах эпицентров землетрясений были взяты на сайте научного агентства The United States Geological Survey (USGS) (<http://earthquake.usgs.gov/>). Землетрясение на Гаити с магнитудой 7.2 по шкале Рихтера было зафиксировано 12 января 2010 г. в 21:53 UTC. Географические координаты эпицентра  $18.46^\circ$  с. ш.,  $72.53^\circ$  з. д. Землетрясение в Японии с магнитудой 9.0 было зафиксировано 11 марта 2011 г. в 05:46 UTC, координаты эпицентра  $38.32^\circ$  с. ш.,  $142.37^\circ$  в. д.

Согласно методике [4] ионосфера представляется в виде тонкого слоя на высоте  $H_i = 400$  км. В каждом случае исследуемые области ионосферы (эпицентральная  $\Omega_i$  и фоновая  $\Omega_\phi$ ) ограничены окружностью радиуса 400 км. Центр  $\Omega_i$  находится над эпицентром, а центр  $\Omega_\phi$  — над выбранной станцией, удаленной от эпицентра на достаточное расстояние.

Исходными данными для проведения исследований были посutoчные измерения и навигационные файлы станций системы International GNSS Service (IGS), доступные на сайте [www.igscb.jpl.nasa.gov](http://www.igscb.jpl.nasa.gov). Значения межканальных задержек аппаратуры спутников ГНСС и станций IGS взяты из файлов глобальных ионосферных карт от Center for Orbit Determination in Europe (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>). Интервал времени, на котором производилась оценка текущих значений  $\Delta \bar{I}_v$ , согласно методике [4], составлял  $T_i = 90$  мин.

При анализе состояния ионосферы рассматривались вариации оценок ионосферной задержки  $\Delta \bar{I}_v$  относительно их средних значений  $\bar{I}_v$  (для соответствующего времени суток)

$$\delta I_v = \Delta \bar{I}_v - \bar{I}_v,$$

что позволило определить пределы вариаций  $\Delta \bar{I}_v$  относительно средних значений на длительном интервале задолго до землетрясения при относительно невозмущенной ионосфере, т. е. найти такое  $L_c$ , при котором

$$|\delta I_v| \leq L_c.$$

Значение  $L_c$  характеризует предел нормальной вариабельности  $\delta I_v$ , а выход за этот предел рассматривается как аномальное изменение  $\delta I_v$ .

**Анализ геомагнитной обстановки перед землетрясениями и выбор фоновых областей.** Анализ геомагнитной обстановки на 30-сут интервале перед землетрясениями был проведен на основе данных лаборатории рентгеновской астрономии Солнца физического института Российской академии наук ([www.thesis.lebedev.ru](http://www.thesis.lebedev.ru)). В качестве показателя состояния магнитосферы рассматривались посуточные суммы  $K_p$ -индексов.

Геомагнитная обстановка перед землетрясением на Гаити ( $M = 7.2$ ) была спокойной, магнитных бурь зафиксировано не было. Геомагнитная обстановка перед землетрясением в Японии ( $M = 9.0$ ) была также относительно спокойной. В рассматриваемом периоде были зафиксированы слабые магнитные бури 18 февраля и 1 марта. На рис. 1 показаны посуточные суммы  $K_p$ -индексов для рассматриваемых землетрясений.

Для оценки влияния на состояние ионосфера факторов глобального характера проводилось исследование ионосферных вариаций в «фоновых» областях ионосферы. При этом полагалось, что факторы глобального характера воздействуют на ионосферу одинаково как в эпицентральной, так и в фоновой областях.

Выбор фоновой области является достаточно сложной задачей, где необходимо учитывать удаленность от эпицентра, природу самого землетрясения (океаническое или континентальное) и др. Проведенное исследование опиралось на измерительную информацию станций системы IGS, поэтому и выбор фоновых областей был обусловлен расположением IGS-станций, по которым была доступна вся необходимая информация (значения межканальных задержек, файлы измерений, навигационные файлы и др.).

**Анализ ионосферных аномалий в подготовительный период сильного землетрясения на Гаити ( $M = 7.2$ ).** Для исследования ионосферных вариаций в эпицентральной области землетрясения на Гаити использовались измерения станций CRO1 и SCUB системы IGS. Другие станции не использовались, поскольку по ним не было достоверных данных о значениях межчастотной

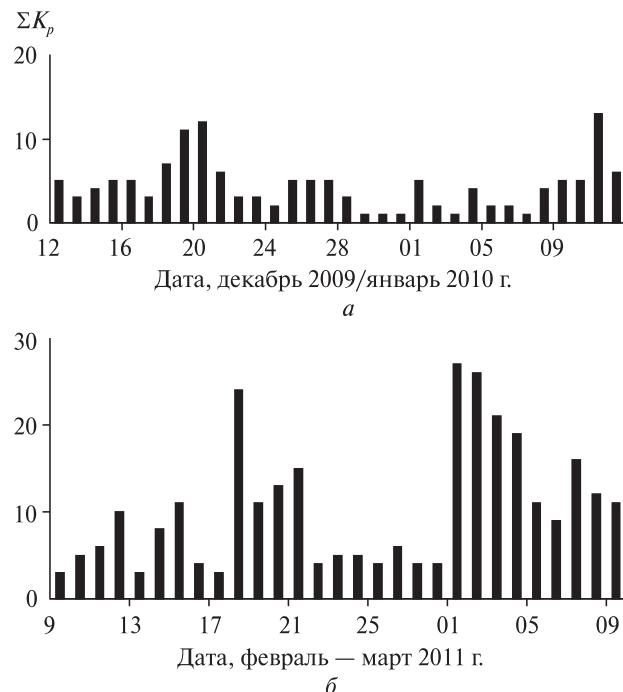


Рис. 1. Посуточные суммы  $K_p$ -индексов перед землетрясениями на Гаити (а) и в Японии (б)

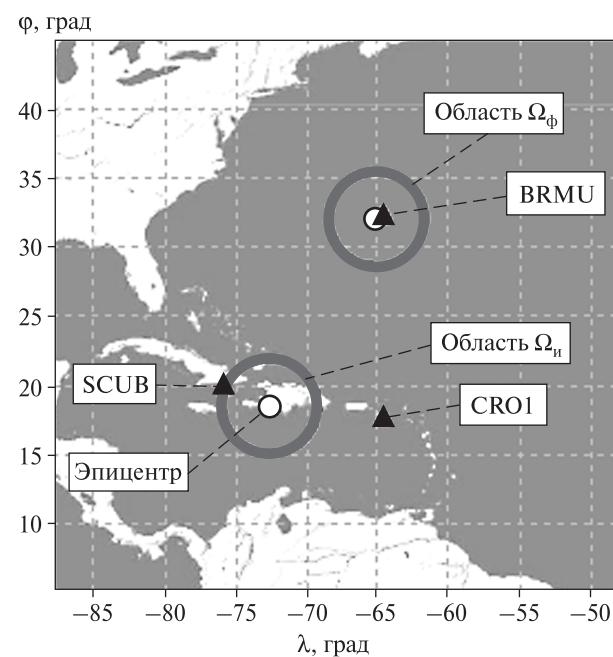


Рис. 2. Схема исследования ионосферы перед землетрясением на Гаити

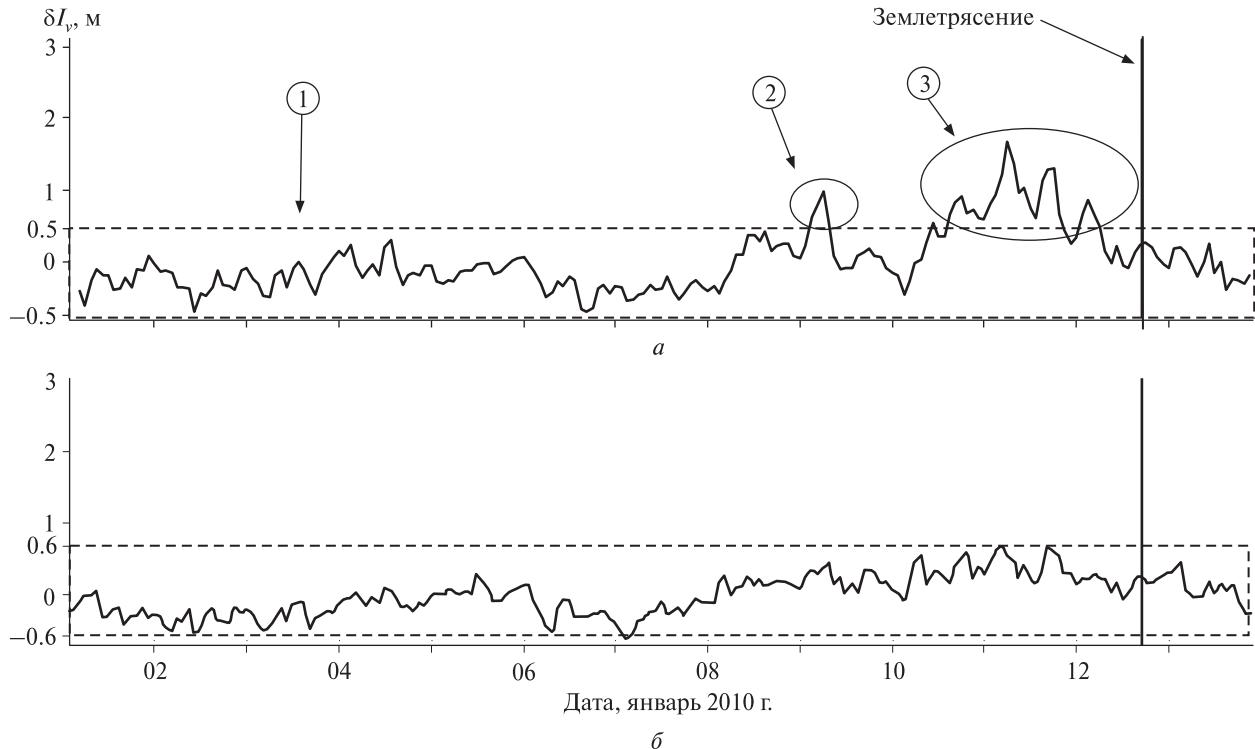


Рис. 3. Ионосферные вариации над эпицентром землетрясения на Гаити (*a*) и в фоновой области (*b*)

задержки. В качестве фоновой была выбрана область ионосферы  $\Omega_\phi$  над станцией BRMU (расстояние от эпицентра около 1800 км). Взаимное расположение станций и областей  $\Omega_i$  и  $\Omega_\phi$  показано на рис. 2.

На рис. 3 показан график изменения  $\delta I_v$  в эпицентральной и фоновой областях. Анализ этих данных показал, что в спокойный период (до 9 января) в эпицентральной области  $\Omega_i$  абсолютное значение отклонения текущей оценки  $\hat{\Delta}I_v$  от среднего значения не превышает 0.5 м (область 1, рис. 3, *a*), т. е. в этом случае

$$L_c = 0.5 \text{ м.}$$

На рассвете 9 января (за 3.5 сут до события) наблюдается резкое однократное увеличение значений  $\delta I_v$  (область 2, рис. 3, *a*) на 0.5 м (около 100 %) относительно  $L_c$ . А с вечера 10 января и практически до землетрясения (12 января) отмечено стабильное увеличение значений  $\delta I_v$  до 0.8...1.5 м (на 50...200 % больше  $L_c$ ) в утреннее и вечернее время (область 3, рис. 3, *a*). Максималь-

ное значение  $\delta I_v$  отмечено на рассвете 11 января за 1.5 сут до землетрясения. Непосредственно перед землетрясением значения  $\delta I_v$  уменьшились до уровня невозмущенной ионосферы.

В фоновой области  $\Omega_\phi$  (рис. 3, *b*) в период до 9 января абсолютное значение отклонения текущей оценки  $\hat{\Delta}I_v$  от среднего значения не превышает около 0.6 м. В период от 9 января до землетрясения (когда в области  $\Omega_i$  зарегистрированы возмущения) вариации  $\delta I_v$  также практически не выходят за пределы 0.6 м. То есть, ионосфера в фоновой области сохраняла стабильное состояние на всем времени исследования и значения  $\delta I_v$  практически не выходили за пределы нормальной вариабельности.

Анализ данных рис. 3 показал, что аномальные (выходящие за пределы нормальной вариабельности) изменения значений  $\delta I_v$  в эпицентральной области ионосферы носят локальный характер, не связаны с влиянием факторов глобального характера и могут быть ассоциированы с подготовительным периодом землетрясения.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования ионосферных аномалий, ассоциированных с землетрясением в Гаити, изложенными в [12].

**Анализ ионосферных аномалий перед землетрясением в Японии ( $M = 9.0$ ).** При исследовании использовались данные станций системы IGS, расположенные в Японии — MIZU, USUD, MTKA и TSKB. В качестве фоновой была выбрана область ионосферы  $\Omega_\phi$  над станцией YAKT (расстояние от эпицентра около 3000 км). Взаимное расположение областей  $\Omega_i$  и  $\Omega_\phi$  показано на рис. 4.

Вариации  $\delta I_v$  в эпицентральной области в подготовительный период землетрясения показаны на рис. 5, а. Их анализ показал, что задолго до землетрясения (с 12 февраля до 3 марта) величина  $\delta I_v$  находится в пределах  $\pm 1$  м (область 1), т. е. в этом случае

$$L_c = 1 \text{ м.}$$

Вариации  $\delta I_v$  в период от 3 марта до землетрясения более детально показаны на рис. 5, б. В дневное время 3 марта (за 8 сут до события) наблюдалось резкое однократное увеличение значения  $\delta I_v$  (область 2 на рис. 5, а, б) на 0.5 м (примерно на 50 %) относительно  $L_c$ . С 6 марта по 10 марта (область 3 на рис. 5, а, б) отмечено стабильное увеличение значений  $\delta I_v$  на 0.5...1 м (50...100 % относительно  $L_c$ ) в дневное время с максимумом 8 марта (за 3 сут до землетрясения). В окрестностях момента землетрясения также отмечается увеличение  $\delta I_v$  примерно на 1 м, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [9].

Вариации значений  $\delta I_v$  в области  $\Omega_\phi$  на рассматриваемом интервале времени показаны на рис. 5, в. На интервале с 12 февраля до 3 марта величина  $\delta I_v$  находится в пределах  $\pm 1$  м (область 1). В период от 3 января до землетрясения (когда в области  $\Omega_i$  зарегистрированы возмущения) вариации  $\delta I_v$  также практически не выходят за пределы  $\pm 1$  м. То есть, можно утверждать, что как и в случае землетрясения на Гаити, ионосфера в фоновой области сохраняла стабильное состояние на всем времени исследования, и значения  $\delta I_v$  практически не выходили за пределы нормальной вариабельности.

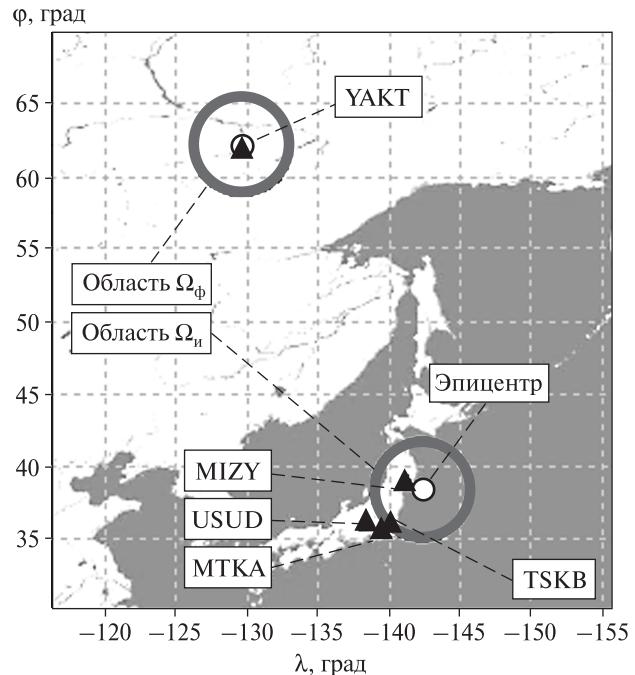
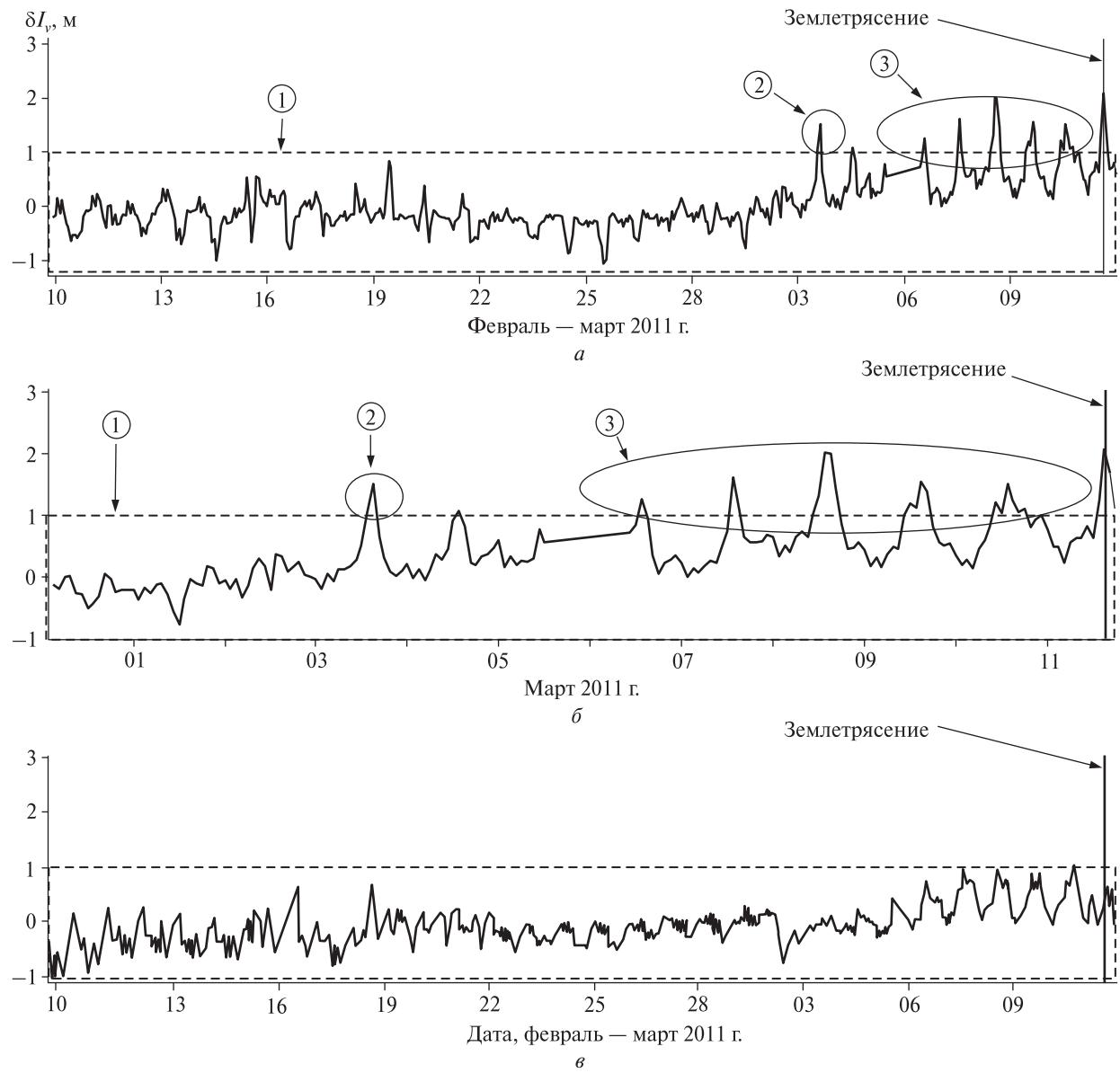


Рис. 4. Схема исследования ионосферы перед землетрясением в Японии

Таким образом, на фоне относительно спокойной геомагнитной обстановки в локальной эпицентральной области ионосферы показано наличие возмущений, которые могут рассматриваться как ионосферный отклик на сейсмическую активность.

**Характерные особенности вариаций ионосферы в подготовительный период землетрясений.** Полученные результаты показывают, что подготовительный период обоих землетрясений характеризуется появлением возмущений в локальной эпицентральной области ионосферы. Учитывая относительно спокойную геомагнитную обстановку и фактическое отсутствие ионосферных возмущений в фоновых областях, отмеченные аномалии ионосферы в эпицентральной области могут быть ассоциированы с подготовкой обоих землетрясений.

Полученные результаты позволили выявить общие свойства изменчивости ионосферы в подготовительный период обоих землетрясений. В период относительно спокойной ионосферы (задолго до землетрясения при спокойной геомаг-

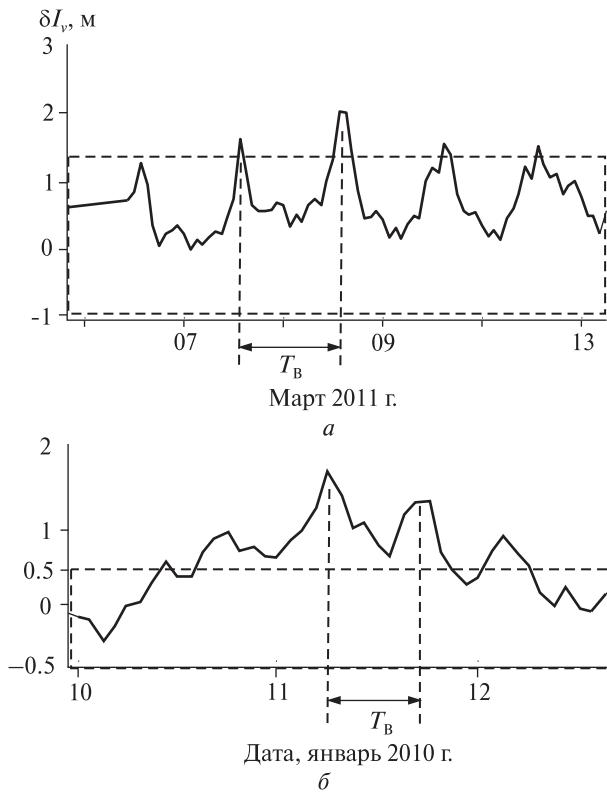


**Рис. 5.** Ионосферные вариации в эпицентralной области землетрясения в Японии на полном интервале исследования (а) и непосредственно перед событием (б), а также в фоновой области (в)

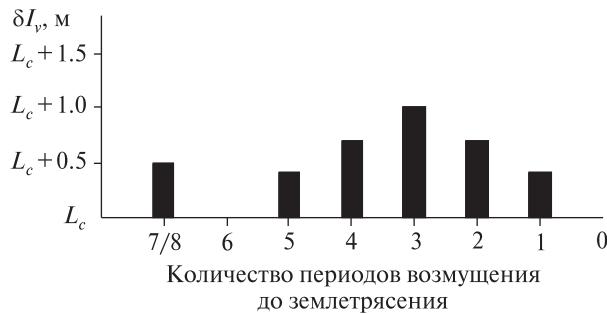
нитной обстановке) абсолютные значения  $\delta I_v$  не превышают некоторого значения  $L_c$ , которое в каждом случае разное, но некоторым образом характеризует пределы нормальной изменчивости  $\delta I_v$  «день-ото-дня» в рассматриваемой области. За 3.5...8 сут до события отмечается однократное увеличение значений  $\delta I_v$  примерно на 0.5 м (50...100 %) больше  $L_c$ . Затем следуетperi-

од (1.5...3 сут), когда значения  $\delta I_v$  соответствуют невозмущенной ионосфере и не выходят за пределы  $L_c$ . За 2...5 сут до землетрясения отмечаются периодические (12...24 ч) выбросы значений  $\delta I_v$  на 0.5...1 м (50...200 %) больше  $L_c$  с максимумом за 1.5...3 сут до события.

Введем величину «период возмущения»  $T_b$ , характеризующий минимальный интервал вре-



**Рис. 6.** К пояснению понятия «период возмущения»  $T_{\text{в}}$  при подготовке землетрясений в Японии (a) и на Гаити (б)



**Рис. 7.** Схематическое отображение вариаций ионосфера перед сильными землетрясениями на Гаити и в Японии (0 — момент землетрясения)

мени между последовательными локальными максимумами значений  $\delta I_v$ . В общем случае значения  $T_{\text{в}}$  могут быть разными для разных землетрясений, что может быть связано с природой их возникновения. Так, в случае землетрясения в Японии  $T_{\text{в}} \approx 1$  сут, а для землетрясения на Гаити  $T_{\text{в}} \approx 12$  ч (рис. 6).

Если значение  $T_{\text{в}}$  использовать в качестве единицы измерения времени, то поведение ионосферы в подготовительный период обоих землетрясений может быть описано единой схемой, представленной на рис. 7.

За семь-восемь периодов  $T_{\text{в}}$  до события отмечается однократное превышение порога  $L_c$  приблизительно на 0.5 м. За пять периодов до события начинается серия превышений порога с нарастающей и затем спадающей амплитудой с максимумом на 1 м, превышающим  $L_c$  за три периода до события.

Отмеченные общие закономерности ионосферных вариаций накануне сильных землетрясений могут оказаться весьма полезными для формализации методов ионосферного мониторинга в сейсмоопасных регионах.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, с использованием методики оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема сигналов ГНСС [4], проведен анализ ионосферных вариаций в подготовительный период сильных землетрясений на Гаити в 2010 г. ( $M = 7.2$ ) и в Японии в 2011 г. ( $M = 9.0$ ). На фоне относительно спокойной геомагнитной обстановки и фактическом отсутствии возмущений в фоновых областях показаны как наличие ионосферных аномалий над эпицентрами за несколько суток до события, так и схожий характер вариаций ионосферы в обоих случаях.

Использованная методика позволяет организовать мониторинг состояния ионосферы и обнаружение подобных аномалий в сейсмоопасных районах ограниченным количеством станций в масштабе времени, близком к реальному. Такой мониторинг может рассматриваться как элемент комплекса мероприятий по предсказанию сильных землетрясений.

1. Аффраймович Э. Л., Астафьевая Э. И., Гохберг М. Б. и др. Поиски предвестников землетрясений в вариациях полного электронного содержания в ионосфере по данным GPS во время землетрясения НЕСТОР MINE 16 октября 1999 г. // 3 Междунар. конф. «Сол-

- нечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». — М.: Ин-т космофиз. исслед. и распространения радиоволн РАН, 2004. — Том 1. — С. 3–18.
2. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. — М.: ИКИ РАН, 2006. — Том II, вып. 3. — С. 190–197.
3. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Мониторинг ионосферных предвестников цунамигенных землетрясений по данным спутниковых навигационных систем // Proc. of 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. — St. Petersburg, 2005. — P. 190–197.
4. Деденок В. П., Ткаченко А. А., Дейнеко В. М., Резников Ю. В. Мониторинг возмущений в локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема спутниковых радионавигационных сигналов // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 68–73.
5. Захаренкова И. Е., Шагимуратов И. И., Лаговский А. Ф., Кранковский А. Вариации полного электронного содержания ионосферы во время Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. // Вестник МГТУ. — 2006. — 9, № 3. — С. 434–439.
6. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: Изд-во ООО «Азбука-2000», 2006. — Том 2, вып. 3. — С. 242–246.
7. Dedenok V., Tkachenko A. Monitoring of ionosphere perturbations preceding high intensive earthquakes on data from satellite radio navigation signal receiver network // Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization: Abstracts of the Internat. Congress. — Istanbul, Turkey, 2011. — P. 40–41.
8. Hayakawa M., Molchanov O. A. Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere // TERRAPUB, Tokyo, Japan. — 2002. — 313 p.
9. Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake // Geophys. Res. Lett. — 2011. — 38. — P. L17312. — 5 p.
10. Liu J., Chen S., Chen Y., et al. Seismo-Ionospheric Precursors of the 26 December 2006 M 7.0 Pingtung Earthquake Doublet // Terrestrial atmospheric and oceanic sciences. — 2008. — 19, N 6. — P. 751–759.
11. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement // Ann. geophys. — 2004. — 22. — P. 1585–1593.
12. Liu J. Y., Le H., Chen Y. I., et al. Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 M7 Haiti earthquake // J. Geophys. Res. — 2011. — 116. — A04302, doi:10.1029/2010JA015704. — 9 p.
13. Saroso S., Liu J., Hattori K., Chen C. Ionospheric GPS TEC anomalies and  $M > 5.9$  earthquakes in Indonesia during 1993 — 2002 // Terrestrial atmospheric and oceanic sciences. — 2008. — 19. — P. 481–488.

Надійшла до редакції 01.03.12

V. V. Khizhniak, V. P. Dedenok, A. O. Tkachenko

IONOSPHERIC DISTURBANCES BEFORE  
THE GREAT EARTHQUAKES IN HAITI ( $M = 7.2$ )  
AND JAPAN ( $M = 9.0$ ) FROM DATA  
OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEMS

Using estimates for ionospheric delays of radio navigation signals from a network of IGS stations, we analysed ionospheric variations over the epicenters of two great earthquakes: in Haiti in January 2010 ( $M = 7.2$ ) and in Japan in March 2011 ( $M = 9.0$ ). Some characteristic features, which were common for both earthquakes, were revealed for changes in the local ionosphere region state over the epicenters of the earthquakes.

УДК 551.510

С. Г. Пилипенко, Л. В. Козак

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ВЕТРОВЫЕ СДВИГИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НАД МОЩНЫМИ УРАГАНАМИ

*Розглянуто зміни зональної і меридіональної складових швидкості вітру на висотах мезосфери над областями потужних погодних утворень – циклонів і антициклонів. Для аналізу використано лімбові супутникової вимірювання космічного апарату UARS. Отримано зміну і поворот вектора швидкості вітру після виникнення ураганів в області висот до 100 км. Ці зміни динаміки атмосфери можна пояснити поширенням атмосферних гравітаційних хвиль в неізотермічній безвітряній атмосфері з урахуванням в'язкості і тепlopровідності. Отримано, що визначальним фактором загасання і поширення хвилі є градієнт висоти однорідної атмосфери (температури) з висотою. Числові розрахунки зміни параметрів верхньої атмосфери Землі в результаті поширення атмосферних гравітаційних хвиль добре узгоджуються з результатами супутникових вимірювань.*

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день много работ посвящено изучению литосферно-тропосферно-атмосферной связи. В частности, в ионосфере и верхней атмосфере над очагами землетрясений наблюдались вариации электронной концентрации в E- и F-слоях [7, 8], свечения [12], изменения яркости дискретных форм полярных сияний [15], изменения температуры верхней атмосферы [10, 20], широкомасштабные неоднородности ионосферной плазмы, вариации потоков энергичных частиц, которые высыпаются в ионосферу из радиационных поясов [9] и т. д.

Несмотря на огромное количество работ, до сих пор нет четкой ясности в понимании того, какие механизмы и на каких высотах преобладают при переносе энергии из нижних областей в верхнюю атмосферу. Среди возможных механизмов рассматриваются как атмосферно-гравитационные волны, так и электромагнитное взаимодействие.

В настоящей работе проведено исследование возможного воздействия мощных погодных образований на термосферную циркуляцию.

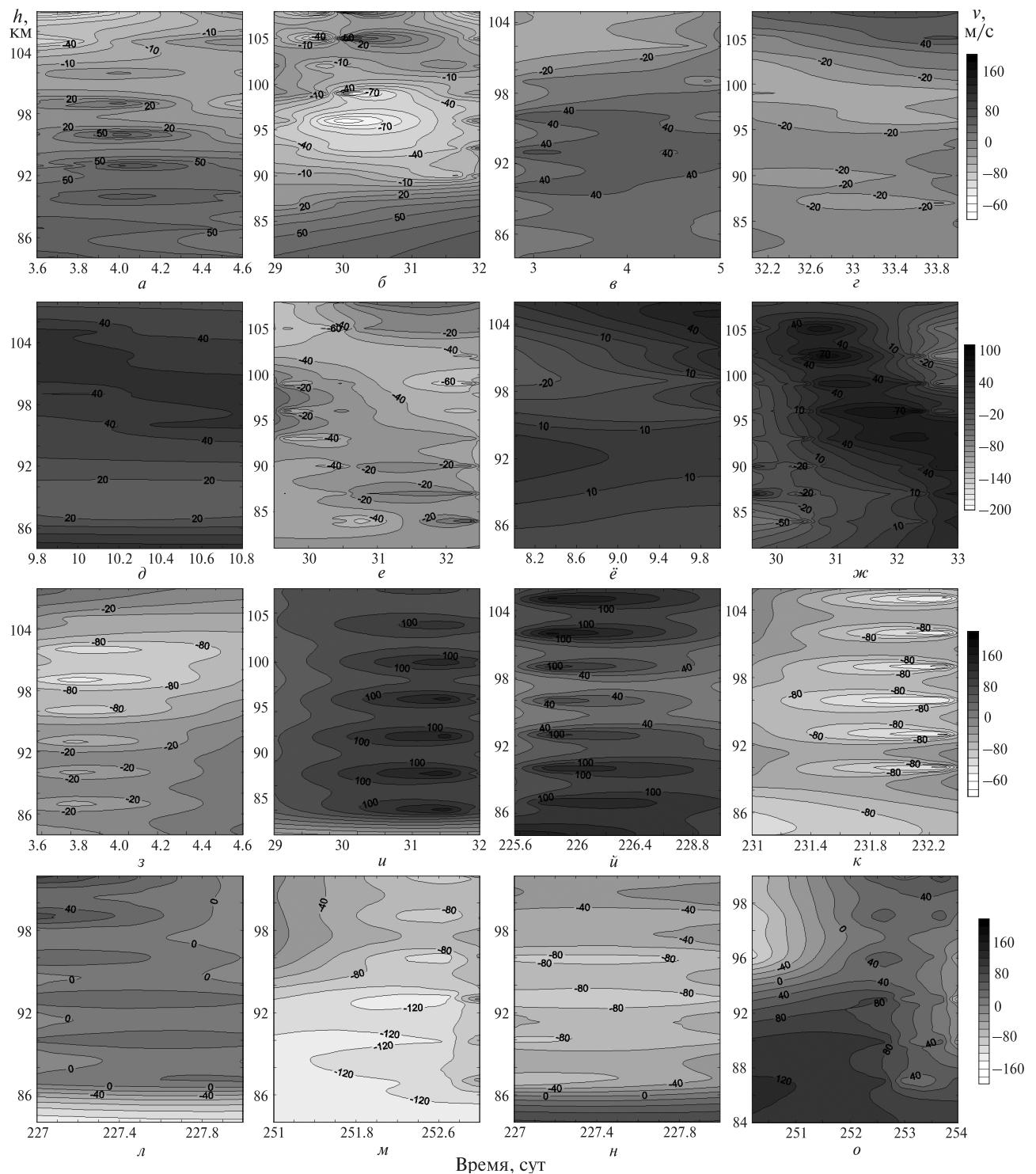
© С. Г. Пилипенко, Л. В. Козак, 2012

Изменение термосферной циркуляции определяется процессом поглощения ультрафиолетового солнечного излучения, диссипацией волн, распространяющихся из плотной нижней атмосферы, а также динамическими процессами, в результате которых происходит перераспределение тепла от неоднородно нагретых источников [4, 11, 13]. И это далеко не полный перечень факторов, которые определяют динамику верхней атмосферы.

Для выявления эффектов, связанных с процессами в тропосфере, нужно учитывать, что они могут быть замаскированы возмущениями другого происхождения, а именно солнечной и геомагнитной активностью, сезонно-широтными вариациями, суточными изменениями.

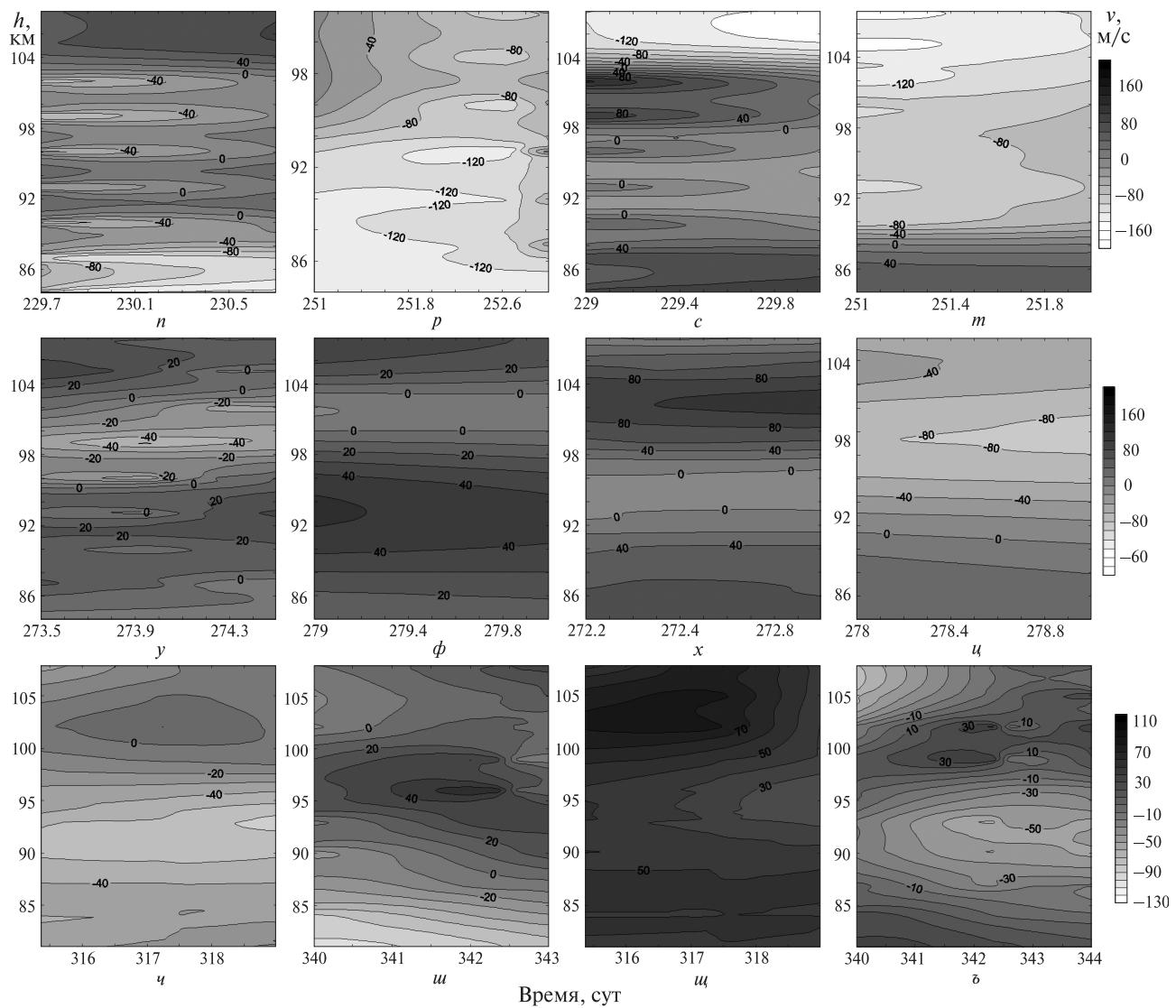
### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования изменения термосферной циркуляции были рассмотрены каталоги ураганов (4-й и 5-й категорий) и спутниковые измерения горизонтальных составляющих скорости ветра за период с декабря 1991 по апрель 1994 г. Значения скорости ветра были получены с помощью прибора WINDII (Wind Imaging Interferometer), установленном на спутнике UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) [22].



Даний прибор проводил измерения горизонтальных составляющих скорости ветра (раздельно приведены зональная и меридиональная

составляющие) в диапазоне высот 80–300 км. Данные представлены с дискретностью 3–5 км по высоте и 4° по широте.



**Рис. 1.** Значение горизонтальных составляющих скорости ветра на разных высотах  $h$ : *а, б* — зональная, *в, г* — меридиональная составляющая скорости ветра во время и после циклона 5 (01.1994); *д, е* — зональная, *ё, ж* — меридиональная составляющая скорости ветра до и во время циклона 13 (02.1994); *з, и* — зональная, *й, к* — меридиональная составляющая скорости ветра во время и после урагана Фернанда (08.1993); *л, м* — зональная, *н, о* — меридиональная составляющая скорости ветра во время и после урагана Кеони (08.1993); *п, р* — зональная, *с, т* — меридиональная составляющая скорости ветра во время и после урагана Грэг (08.1993); *у, ф* — зональная, *х, ц* — меридиональная составляющая скорости ветра во время и после урагана Тина (09.1992); *ч, ш* — зональная, *щ, з* — меридиональная составляющая скорости ветра до и во время циклона 5 (12.1991)

По своему устройству данный прибор — это оптический интерферометр Майкельсона с девятью фильтрами, которые обеспечивают наблюдения в отдельных эмиссиях [23]. Наблюдения производились двумя телескопами, которые

расположены под углами  $45^\circ$  и  $135^\circ$  относительно вектора скорости спутника.

Определение ветра верхней атмосферы сделано по доплеровскому смещению эмиссионных линий [23].

## МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводились двумя путями. В первом подходе проведен анализ разных компонентов горизонтальной составляющей в высотном диапазоне от 80—300 км, во втором — рассмотрены значения ветра для конкретных ураганов на определенной высоте.

Особенности изменения меридиональной и зональной составляющих скорости ветра рассматривались в зоне с радиусом 1000 км (рис. 1).

Среди полученных результатов можно отметить усиление меридиональной составляющей скорости ветра в северном направлении на высотах 85—105 км непосредственно после урагана. Для зональной составляющей на данных высотах имеет место сложная зависимость скорости ветра с преобладающим усилением в восточном направлении.

Для высот больше 105 км наблюдались незначительные усиления меридиональной составляющей в южном направлении, а изменения зональной составляющей скорости ветра малы (возможно, это следствие турбулентных движений в этой области).

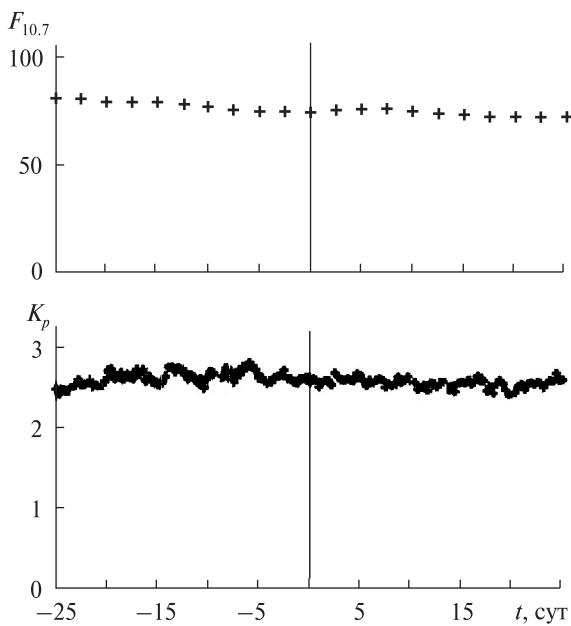


Рис. 2. Значение потока излучения от Солнца на длине волны  $\lambda = 10.7$  см и 3-часового  $K_p$ -индекса относительно наиболее мощных стадий рассмотренных ураганов

Наибольшее изменение горизонтальных составляющих скорости ветра наблюдается на высотах около 100 км.

Для того чтобы убедиться, что полученные особенности изменения зональной и меридиональной составляющих ветра являются следствием тропосферных воздействий, мы учитывали другие возможные факторы воздействия на динамику верхней атмосферы — влияние солнечной и геомагнитной активности. На рис. 2 построен ход изменения потока от Солнца на длине волны 10.7 см и значение 3-часового  $K_p$ -индекса относительно начала рассмотренных событий (наиболее мощных стадий ураганов).

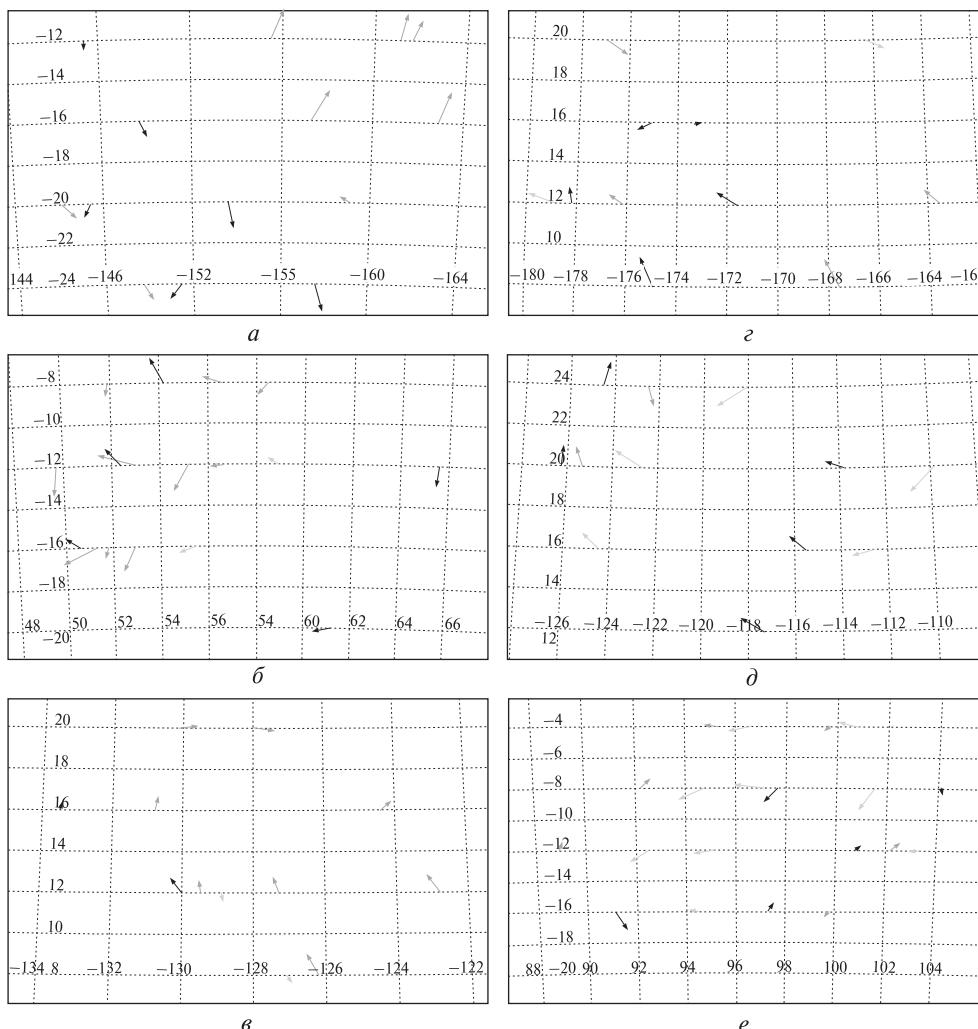
Видно, что солнечная и геомагнитная активность не может обусловить полученные изменения термосферной циркуляции.

Кроме того, были построены карты скорости ветра на высоте около 100 км для ураганов 4-й и 5-й категории мощности в пределах расстояний 1200 км (рис. 3). Приведены карты горизонтального ветра для измерений, которые имели место во время, до или после наиболее мощной стадии урагана. Модуль скорости ветра соответствует длине стрелки, масштаб которой (максимальное значение) указан под рисунком. Временная зависимость отображена в градациях серого цвета. Черный цвет стрелки соответствует времени, наиболее близкому к урагану, серый — моментам времени до и после урагана.

При рассмотрении вектора скорости для конкретных ураганов отмечается усиление горизонтальной циркуляции и поворот вектора скорости ветра на высоте около 100 км на расстояниях до 900 км в течение 3—6 сут после наиболее мощной стадии циклонических или антициклонических образований. Возможно, это свидетельствует о вращении вектора скорости в данной области в сторону от урагана.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

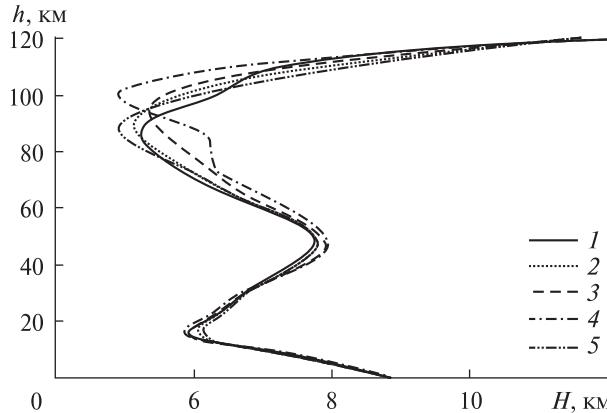
Одним из механизмов, которые могут быть привлечены для объяснения полученных результатов, является распространение атмосферных гравитационных волн (АГВ), которые генерируются в области мощных тропосферных источников. При адиабатическом распространении



**Рис. 3.** Карты изменения горизонтальной скорости ветра над мощными ураганами на высоте около 100 км: *а* — циклон 5 (02.01.1994 г.), *б* — циклон 13 (31.01.1994 г.), *в* — ураган Фернанда (14.08.1993 г.), *г* — ураган Кеони (16.08.1993 г.), *д* — ураган Тина (30.09.1992 г.), *е* — циклон 5 (06.12.1991 г.). Временная зависимость отображена в градациях серого цвета. Черный цвет стрелки соответствует времени, наиболее близкому к урагану, серый — моментам времени до и после урагана. Модуль скорости ветра соответствует длине стрелки, максимальное значение (масштаб) которой для *а*, *б*, *д*, *е* — 100 м/с, а для *в*, *г* — 200 м/с

вверх амплитуда АГВ увеличивается, так как плотность среды с высотой уменьшается [1, 3]. Поэтому и выявить эти волны легче на больших высотах. На определенной высоте вся картина колебаний перестанет быть устойчивой. Кроме того, наличие среднего ветра и минимума температуры приводят к тому, что в области мезопаузы возникают отраженные и преломленные гравитационные волны и условия для их волно-

водного распространения. Скорость и направление ветра, вследствие взаимодействия с волной, также должны претерпевать изменение. Причем согласно [1, 6] величина этих изменений зависит от относительного направления ветра и волны. Затухание АГВ приводит к образованию тонких турбулентных слоев, которые могут оставаться еще долго после «выключения» волнового источника турбулизации [2, 5, 14, 19].



**Рис. 4.** Изменения высоты однородной атмосферы, рассчитанные по модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 для областей и моментов наиболее мощной стадии ураганов (1–4 – соответственно ураганы 14, 16, 18 августа и 11 сентября 1993 г., 5 – ураган 2 января 1994 г.)

Для численного моделирования распространения АГВ в атмосфере был взят за основу метод решения уравнений Навье – Стокса с учетом диссипативных процессов [10, 16, 17, 21]. При этом атмосфера представляется в виде однородных слоев, в которых температура  $T_0$ , масса  $M$ , адиабатическая постоянная  $\gamma$ , ускорение свободного падения  $g$ , отношение коэффициента вязкости к плотности  $\mu/\rho_0$ , и отношение коэффициента теплопроводности к плотности  $\lambda/\rho_0$  являются постоянными. Исходной для расчетов есть линеаризованная относительно невозмущенного фонового состояния система уравнений [10]:

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial u_i'}{\partial t} &= -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \rho' g_i + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{u}' \right) \right] - \\ &- \sigma_p B^2 \cdot [u_i' - b_i(\mathbf{u}' \cdot \mathbf{b})], \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{u}') &= 0, \\ \frac{\rho_0 R}{(\gamma-1)M} \frac{\partial T'}{\partial t} &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T') - \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u}'. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $u'$ ,  $p'$ ,  $\rho'$  – возмущение скорости, давления и плотности, вызванные прохождением волн,

$\sigma_p$  – проводимость,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $B$  – индукция магнитного поля,  $\hat{b}$  ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ) – единичный вектор индукции магнитного поля.

Волны в сопредельных слоях связывались условием неразрывности между слоями вертикальной скорости и вертикального потока импульса:

$$\begin{aligned} [u_z']_{z_n^+} &= [u_z']_{z_n^-}, \\ \left[ p' - \frac{u_z' p_0}{i\omega H} - \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u_z'}{\partial z} - \frac{2}{3} i\mu k_x u_x' \right]_{z_n^+} &= \\ \left[ p' - \frac{u_z' p_0}{i\omega H} - \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u_z'}{\partial z} - \frac{2}{3} i\mu k_x u_x' \right]_{z_n^-}. \end{aligned} \quad (2)$$

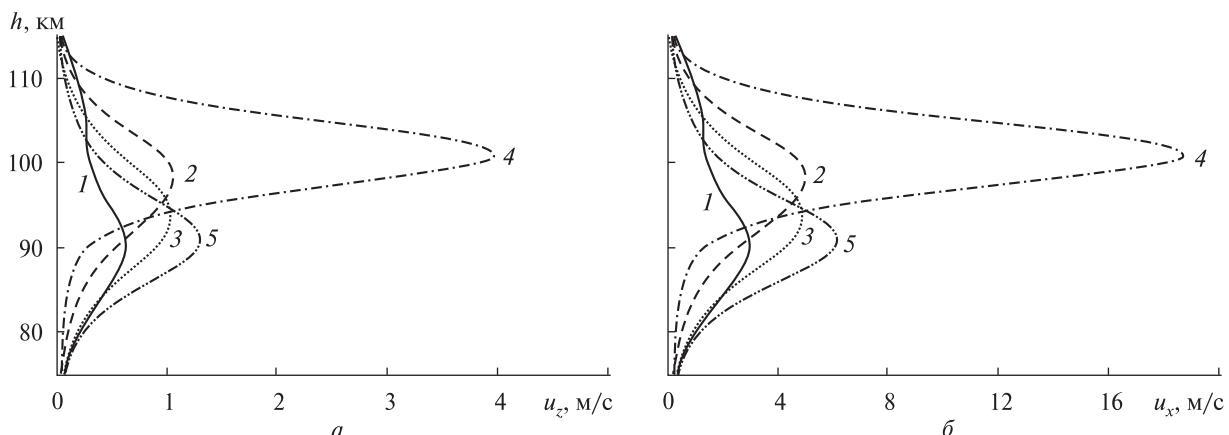
Соотношения (2) получены из линеаризованного тензора потока импульса первого порядка

$$\pi_{ij} = p' \delta_{ij} - \mu \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{u}' \right). \quad (3)$$

При этом комплексный горизонтальный волновой вектор  $k_x$  и действительная частота  $\omega$  – постоянные вдоль всей атмосферы, так как мы предполагаем, что окружающая атмосфера не зависит от  $x$  и  $t$ . Комплексное же вертикальное волновое число  $k_z$  изменяется от слоя к слою. При расчетах считаем, что магнитное поле имеет составляющую как по оси  $z$ , так и по оси  $x$  (т. е.  $\sigma_p \neq 0$ ).

Для моделирования распространения АГВ использовались профили температур и концентраций основных составляющих нейтральной атмосферы, взятые из модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 [18]. Определенная зависимость высоты однородной атмосферы показана на рис. 4, где для исключения сезонных изменений рассматривались конкретные даты, когда происходили ураганы.

С помощью численного моделирования решений системы (1) [21] получено изменение с высотой амплитуды вертикальной составляющей скорости для АГВ с периодом 35 мин и значением  $k_x = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  (при уменьшении значения  $k_x$  уменьшится амплитуда колебаний, а основные закономерности не изменятся) (рис. 5). Значение профилей амплитуды АГВ рассчитаны для разных дней на протяжении 1993–1994 гг. Обоз-



**Рис. 5.** Изменение с высотой амплитуды вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющих скорости для атмосферных гравитационных волн с периодом 35 мин. Обозначения см. на рис. 4

нчения аналогичны обозначениям на рис. 4. Следует также добавить, что при увеличении периодов с 35 до 85 мин наблюдается увеличение и амплитуды как вертикальной, так и горизонтальной составляющей скорости ветра.

Из графиков хорошо прослеживается, что при выбранных параметрах моделирования волны распространяются к высотам 120 км, а максимальное значение их амплитуды отвечает диапазону высот от 90 до 100 км.

Важно, что рассчитанные профили значения скорости при распространении АГВ будут накладываться на общие изменения скорости как с высотой, так и в пространстве.

Модельные расчеты показывают, что АГВ затухают к высотам 120 км, следовательно, изменение магнитного поля с высотой можно не учитывать.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрено изменение динамики тропосферной области над ураганами. Из анализа семи событий категории 4 и 5 получено изменение (увеличение) горизонтальной составляющей скорости ветра на высотах 85–105 км. Данное изменение скорости ветра можно объяснить распространением и затуханием АГВ. Так, при численном моделировании распространения АГВ в неизотермической, стратифицированной по плотности и по концентрации основных составляющих атмосфере с учетом вязкости и тепло-

проводности при выбранных параметрах можно выделить следующее:

- высота максимальной амплитуды АГВ, после которой идет затухание волн, зависит главным образом от изменения температуры с высотой.
- затухание волн наблюдается на высотах после 100 км от поверхности Земли.
- от коэффициентов вязкости и теплопроводности зависит амплитуда АГВ, и слабо зависит высота диссипации.
- относительные вариации скорости ветра на высотах мезопаузы в результате распространения АГВ при выбранных параметрах составляют 10–20 м/с.

В результате анализа получен вывод, что АГВ являются одним из механизмов переноса энергии из нижних слоев атмосферы в верхние, а их затухание может приводить к локальным динамическим процессам и возникновению турбулентных слоев.

*Авторы благодарны В. Н. Ивченко за полезные обсуждения. Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДФФД-РФФИ №Ф40.2/053.*

1. Гаврилов Н. М. Распространение внутренних гравитационных волн в стратифицированной атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1985. — 21. — С. 921–927.
2. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосферы // Тр. Физ. ин-та. АН СССР. —

1982. — **130.** — С. 29—47. — (Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова).
3. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1975. — 532 с.
  4. *Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д.* Движения в ионосфере. — Новосибирск: Наука, 1979. — 344 с.
  5. *Козак Л. В.* Зміна турбулентних процесів у нижній термосфері при проходженні внутрішніх гравітаційних хвиль // Космічна наука і технологія. — 2002. — **8**, № 5/6. — С. 86—90.
  6. *Козак Л. В., Івченко В. Н.* Изменение ветра в верхней атмосфере над землетрясениями по спутниковым измерениям // Космическая наука и технология. — 2002. — **8**, № 4. — С. 54—63.
  7. *Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др.* Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия. — 1983. — **23**, № 5. — С. 842—846.
  8. *Литеровский В. А., Похотов О. А., Шалимов С. Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992. — 340 с.
  9. *Перцев Н. Н., Шалимов С. Л.* Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. — 1996. — **36**, № 2. — С. 111—118.
  10. *Пилипенко С. Г., Козак Л. В.* Аналіз поширення та затухання атмосферних гравітаційних хвиль // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 4. — С. 22—29.
  11. *Термосферная циркуляция /* Под ред. У. Уэбба. — М.: Мир, 1975. — 350 с.
  12. *Фишкова Л. М., Торошелидзе Т. И.* Отображение сейсмической активности в вариациях свечения неба // Полярные сияния и свечение неба. — М.: Наука, 1989. — **33**. — С. 17—23.
  13. *Хайнс К. О.* Термосферная циркуляция. — М.: Мир, 1975. — 428 с.
  14. *Юдин В. А., Гаврилов Н. М.* Полуэмпирическая модель замыкания системы уравнений для гравитационных волн и мелкомасштабной турбулентности в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1989. — **25**, № 10. — С. 1026—1032.
  15. *Dzubenko M. I., Kozak L. V.* Aurora activity depression after near seismic shocks // Proceedings of International Symposium: From solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and groundbased observations. Febr. 1—4, 2000, Kyiv. Ukraine. — Kyiv, 2000. — P. 129—131.
  16. *Francis S. H.* Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**. — P. 2278—2301.
  17. *Francis S. H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. Terr. Phys. — 1975. — **37**. — P. 1011—1054.
  18. *Hedin A. E.* Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. — 1991. — **96**. — P. 1159—1172.
  19. *Hocking W. K.* Turbulence in the altitude region 80—120 km // Adv. Space Res. — 1990. — **10**, N 12. — P. 153—161.
  20. *Kozak L. V., Dzubenko M. I., Ivchenko V. M.* Temperature and thermosphere dynamics behavior analysis over earthquake epicentres from satellite measurements // Phys. and Chem. Earth. Parts A/B/C. — 2004. — **29**, N 4—9. — P. 507—515.
  21. *Pylypenko S. G., Kozak L. V.* Variations of the temperature of mesosphere above storms from satellite measurements // WDS'11 Proceedings of contributed papers. Part II. Physics of plasmas and ionized media (MatfyzPress, vydavatelstvi Matematiko-fyzikalni fakulty Univerzity Karlovy v Praze). — 2011. — P. 97—102.
  22. *Reber C. A., Trevathan C. E., McNeal R. J., Luther M. R.* The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**, N D6. — P. 10643—10647.
  23. *Shepherd G., Thuillier G., Gault W. A., et al.* WINDII — The wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**, N D6. — P. 10725—10750.

*Надійшла до редакції 21.08.12*

S. G. Pilipenko, L. V. Kozak

#### WIND SHIFTS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE OVER POWERFUL HURRICANES

We consider changes of the zonal and meridional components of wind velocity at the mesosphere altitudes over areas of powerful weather formations — cyclones and anticyclones. Satellite limb measurements of the spacecraft UARS are used for the analysis. The change and rotation of wind velocity vector after the hurricane occurrence at altitudes of 100 km are obtained. These changes in the atmosphere dynamics can be attributed to the propagation of atmospheric gravity waves (AGW) in the non-isothermal windless atmosphere with consideration for viscosity and thermal conductivity. It is found that the determining factor of the wave attenuation and expansion is the gradient of the uniform atmosphere height (temperature) on height. The satellite measurement results are in good agreement with the numerical calculations of changes in the Earth's upper atmosphere parameters as a result of the AGW propagation.

Г. В. Шевченко, Е. Л. Кордюм

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЙ *ARABIDOPSIS THALIANA*-GFP-ABD2 В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЦИТОСКЕЛЕТА В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРОВАННОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ

*Використання трансформованих рослин *Arabidopsis thaliana*-GFP-ABD2 в експериментах з дослідження впливу модельованої мікрогравітації (клиностатування) на цитоскелет виявило взаємодію актинових мікрофіламентів з іншими елементами цитоскелета, а саме з тубуліновими мікротрубочками. Дослідження показали, що взаємодія між мікрофіламентами та мікротрубочками має важливе значення для росту клітин у дистальній зоні розтягу кореня. Взаємодія між елементами цитоскелета в умовах стаціонарного контролю відрізняється від такої в умовах клиностатування. Обговорюється можливий механізм даної взаємодії.*

Несмотря на довольно длительный опыт проведения экспериментов с растительным материалом в условиях космических полетов исследованы далеко не все вопросы, относящиеся к способности растений воспринимать гравитацию. Невыясненной остается природа гравичувствительности растительной клетки, неспециализированной к восприятию гравитации, которая, как известно, реагирует на изменения силы тяжести изменениями ультраструктуры и метаболизма [11]. Одним из структурных элементов, опосредующих гравичувствительность клетки, является цитоскелет [1, 2]. Основные составные цитоскелета — микротрубочки (МТ) и микрофилааменты (МФ) — полимерные структуры, образованные белками тубулином и актином [7]. Цитоскелет обеспечивает деление клеток, их рост, а также внутриклеточные сигнальные реакции. Упорядоченная организация элементов цитоскелета существенна для роста клеток в дистальной зоне растяжения корня (ДЗР), расположенной между апикальной меристемой и базальной частью зоны растяжения [3]. Это зона формирования изгиба корня при гравистимуляции растения. Из всех ростовых зон корня ДЗР

наиболее чувствительна к внешним стимулам, таким как механическое воздействие, действие ионов металлов, кислорода и ауксина [6, 15]. Частично такая чувствительность обусловлена изменениями организации МТ и МФ. Так, нарушение упорядоченной структуры МТ в ДЗР в клетках корней растений *Arabidopsis thaliana* при клиностатировании приводит к изменению размеров клеток [22]. Несмотря на довольно широкую изученность функций цитоскелета, до сих пор не определена роль отдельных элементов цитоскелета, как МТ, так и МФ, в процессах, происходящих в растительной клетке в условиях микрогравитации.

Как известно, актиновые МФ регулируют рост клеток, контролируя транспорт везикул к местам активного роста клеточной стенки [6]. Этот процесс осуществляется при взаимодействии МФ с МТ [23, 25]. Для наблюдения такого взаимодействия необходимо создание специфических экспериментальных условий. Поскольку участие сети актина в росте и взаимодействие между МФ и МТ в ростовых процессах устанавливалось на Земле при постоянном действии силы тяжести, проведение экспериментов в условиях моделированной микрогравитации (клиностатирование) позволяет выявить механизм

регулирования и функционирования отдельных элементов цитоскелета в процессе роста растительных клеток.

В своих исследованиях мы впервые использовали трансгенные растения *Arabidopsis thaliana*-GFP-ABD2, в конструкции которых сцеплены ген белка фимбринса, связывающегося с актином ABD2 (актин-связывающий домен 2) и ген зеленого флуоресцентного белка GFP, что позволяет декорировать МФ [24] и визуализировать их в живых растениях непосредственно после клиностатирования (или доставки с орбиты космического корабля). Применение данных растений способствует развитию космической биологии, поскольку исключает процесс фиксации растений и связанные с этим погрешности в интерпретации результатов. Как известно, фиксатор (формальдегид или глутаральдегид) может искажать структуру цитоскелета, в особенности самого тонкого ее элемента — сети актиновых МФ (до 6 нм в диаметре).

Для определения того, каким образом рост клеток в ДЗР корня зависит от организации МФ и их взаимодействия с МТ, мы использовали фармацевтический подход и анализировали организацию МФ в клетках коры в ДЗР корней проростков *A. thaliana*-GFP-ABD2 после деполимеризации белков актина и тубулина в контроле и при клиностатировании. Ниже мы обсудим, каким образом МФ контролируют рост клеток в ДЗР корня *A. thaliana*, и могут ли они непосредственно воспринимать изменения силы тяжести. Растения *A. thaliana*-GFP-ABD2 рассматриваются в качестве объектов для экспериментов по моделированию микрогравитации в лабораторных условиях и возможности их использования на борту орбитальной станции.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В эксперименте использовали трансформированную линию *A. thaliana* (L) Heynh экотип Columbia-GFP-ABD2 (любезно предоставленную проф. Д. Фолькманном и Ф. Балушкой из университета г. Бонн, Германия). Семена стерилизовали в растворе 50 % этанола и 3 % перекиси водорода (5 мин), промывали в дистиллированной воде и высаживали в стеклянные трубы

( $r = 1$  см) на среду Murashige-Skoog (MS) (Sigma, Co.). Трубы заворачивали в темную бумагу и оставляли в стационарном контроле и на медленно вращающемся горизонтальном клиностате ( $2 \text{ мин}^{-1}$ ) на 7 сут. Для деполимеризации МТ и МФ использовали гербицид оризалин (20 мКМ) и цитохалазин D (CD) (10 мКМ) за 4 ч до наблюдения. Исследовали шесть вариантов экспериментальных проростков: 1) стационарный контроль, 2) контроль с добавлением CD, 3) контроль с добавлением оризалина, 4) горизонтальное клиностатирование, 5) клиностатирование с добавлением CD, 6) клиностатирование с добавлением оризалина. В каждом варианте измеряли не менее 35 клеток. Все эксперименты повторяли три раза. Статистический анализ проводили на программе Origin 7.5 (t-test). После снятия с клиностата проростки исследовали в лазерном конфокальном микроскопе LSM5 Pascal (Zeiss, Germany) при длине волны для флуоресцентного белка GFP 500–600 нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Организация микрофиламентов в дистальной зоне растяжения корней *Arabidopsis*-GFP-ABD2.** У проростков *Arabidopsis*-GFP-ABD2 ДЗР начинается приблизительно на расстоянии  $143.58 \pm 2.24$  мКМ от верхушки корня. В ДЗР клетки растут диффузно (изотропно), т. е. всей поверхностью, а в центральной зоне растяжения (ЦЗР) — предпочтительно в одном направлении (анизотропно) [4]. Актиновые МФ в ДЗР и в контрольных и клиностатированных корнях формировали сеть как из переплетенных пучков различной плотности, так и из отдельных микрофиламентов (рис. 1). Область клеточных стенок была ярче из-за связи МФ с цитоплазматической мембраной.

Не отмечено видимой разницы в организации МФ в зонах корня между контрольными и экспериментальными растениями. Согласно нашим измерениям клиностатирование не оказывало существенного влияния на длину и ширину клеток ДЗР (таблица).

**Организация МФ в ДЗР растений *A. thaliana*-GFP-ABD2, обработанных цитохалазином D.** Разрушение актина цитохалазином D приводило к частичному повреждению сети МФ как в конт-

рольных, так и в клиностатированных растениях. Сеть МФ в клетках заметно фрагментирована. Центральная область клеток преимущественно лишена филаментных структур, их фрагменты скапливались на периферии (рис. 2, б).

В контроле разрушение МФ приводило к утрате формы клеток, а иногда даже к их разбуханию (рис. 2, а), что не наблюдалось при клиностатировании (рис. 2, б). Измерение размеров клеток обнаружило разницу в длине и ширине по сравнению с клиностатированными растениями (таблица).

При клиностатировании сеть МФ также выглядела поврежденной (рис. 2, б). Наиболее сильные повреждения приводили к хаотичному расположению фрагментов МФ по всей клетке и частому их скоплению возле клеточных стенок. Несмотря на видимые повреждения, параметры клеток при клиностатировании были более выровненными, чем в контроле (таблица).

**Организация МФ в ДЗР растений *A. thaliana*-GFP-ABD2, обработанных оризалином.** Разрушение МТ оризалином также приводило к частичному нарушению организации МФ в ДЗР проростков *A. thaliana*-GFP-ABD2 (рис. 3).

Отличительной особенностью обработки оризалином является появление наряду с разрушенными филаментами точечных скоплений актина во всей ДЗР корня (рис. 3), что свидетельствует

#### Параметры клеток в дистальной зоне растяжения корней *Arabidopsis thaliana*-GFP-ABD2, обработанных цитохалазином D и оризалином

Эксперимент	Длина клеток, мкм	Ширина клеток, мкм
<i>Необработанные клетки</i>		
Контроль	15.98 ± 2.84	16.49 ± 2.84
Клиностатирование	14.99 ± 2.48	15.14 ± 2.82*
<i>Обработка цитохалазином D</i>		
Контроль	12.22 ± 1.74	13.48 ± 2.12
Клиностатирование	16.08 ± 2.38*	16.12 ± 2.46*
<i>Обработка оризалином</i>		
Контроль	15.52 ± 2.35	15.25 ± 1.67
Клиностатирование	14.51 ± 2.29	14.78 ± 2.18

\* статистически достоверная разница ( $p < 0.05$ )

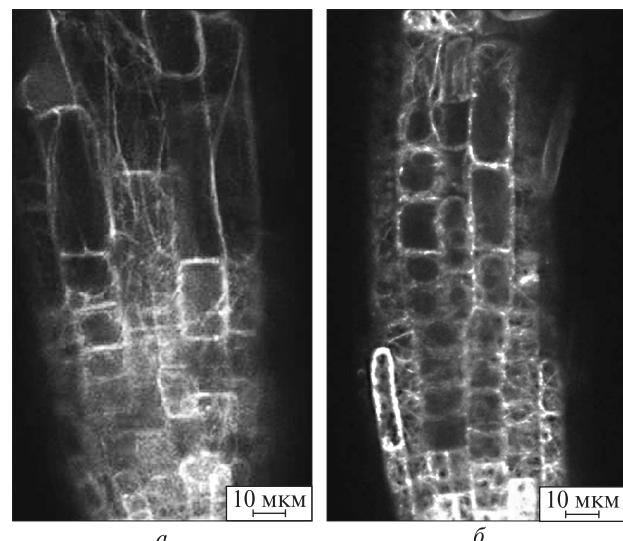


Рис. 1. Организация микрофиламентов в клетках зоны растяжения растений *A. thaliana*-GFP-ABD2: а — контроль, б — клиностатирование

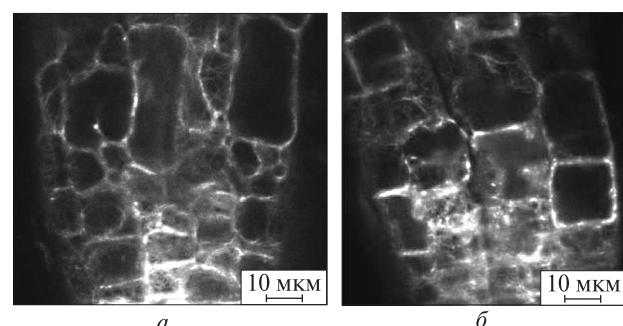


Рис. 2. Микрофиламенты в дистальной зоне растяжения растений *A. thaliana*-GFP-ABD2, обработанных цитохалазином D: а — контроль, б — клиностатирование

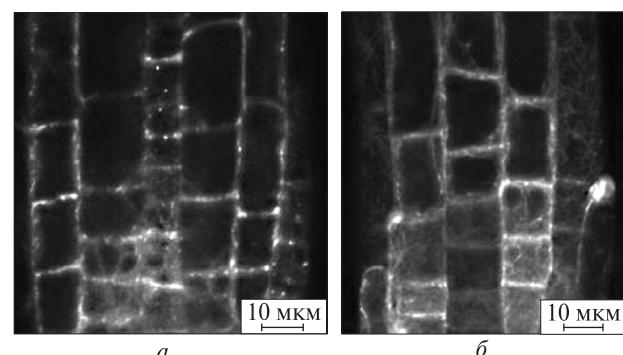


Рис. 3. Микрофиламенты в дистальной зоне растяжения корней проростков *A. thaliana*-GFP-ABD2, обработанных оризалином: а — контроль, б — клиностатирование

о нарушении организации сети МФ. Это явление подтверждает взаимодействие между МФ и МТ [22]. В этом эксперименте с обработкой оризалином не наблюдали видимой разницы в повреждении МФ между контрольными и экспериментальными растениями. Измерение параметров клеток также не выявило существенного отличия в размерах клеток (таблица), также подтверждая тот факт, что разрушение МТ в ДЗР существенно не влияет на рост клеток.

**Роль МФ в росте клеток в ДЗР корней *A. thaliana*.** Наши эксперименты показали, что клиностатирование существенно не изменяло организацию МФ и размеры клеток в ДЗР простков *A. thaliana*-GFP-ABD2. Исходя из этого можно предположить, что МФ не реагируют непосредственно на изменение силы тяжести. Однако этот факт не исключает изменения организации МФ, поскольку ориентация пучков актина зависит от организации МТ, которые, в свою очередь, подвергаются рандомизации при клиностатировании [21]. Следует отметить, что тонкие изменения сети актина в целом не так легко обнаружить визуальным наблюдением под микроскопом ввиду чрезвычайно тонкой структуры МФ и их сеткообразной организации, без четкой ориентации отдельных фи lamentов. Применение цитохалазина D в контроле привело к частичному разрушению сети МФ и большей разнице размеров клеток, что показывает некоторые замедление роста клеток. Это подтверждает известный факт о том, что именно МФ выполняют лидирующую роль в регулировании роста клеток, особенно в ДЗР корня [4, 7]. При клиностатировании четко наблюдали разрушение МФ, которое, однако, не приводило к изменению параметров клеток до такой степени, как это происходило в контроле, доказывая тем самым, что организация МФ у клиностатируемых растений более стабильна.

Появление разрушенных МФ в ДЗР после де-полимеризации тубулина подтверждает вклад МТ в организацию МФ. Похожие эффекты наблюдались и у растений линии *Arabidopsis*-GFP-MAP4 (с декорированными МТ), у которых разрушение МФ влияло на организацию МТ и размеры клеток [22]. Другие исследования также

показали, что пертурбации одного из элементов цитоскелета способны вызвать изменения в организации другого [8]. Так, на примере корневых волосков мутанта *distorted2* (*dis2*) (с нарушением полимеризации кортикальных МФ) показано, что эндоплазматические МТ формируют кластеры и пучки в местах полимеризации МФ. Также они являются гиперчувствительными к разрушителям МТ, что предполагает меньшую динамичность последних по сравнению с контролем. Сходные результаты были получены и при применении низких концентраций латрункулина/цитохалазина (ингибиторы полимеризации МФ), которые также приводили к группировке МТ в пучки и снижение их динамичности [18, 20].

О взаимодействии кортикальных МФ и МТ свидетельствует также тот факт, что функционирование кортикальных МТ необходимо для восстановления кортикального актинового цитоскелета после повреждения [19].

Согласно нашим предыдущим наблюдениям [22] разрушение самих микротрубочек не приводит к большим изменениям размеров клеток. Этим подтверждается идея о том, что в отличие от МФ МТ не играют ведущей роли в удлинении клеток. Таким образом, в настоящее время неясным остается вопрос, каким образом взаимозависимая организация элементов цитоскелета влияет на их функционирование и ростовые процессы в растительной клетке.

Общепринятым является представление о том, что кортикальные микротрубочки определяют форму клеток, своим расположением определяя упорядоченное размещение целлюлозных фибрилл клеточной стенки [14, 26]. Известно, что доставка материала клеточной стенки к цитоплазматической мембране обеспечивается актиново-миозиновой системой, и цитоплазматический актин необходим для направленного попадания везикул Гольджи с компонентами цитоплазматической мембранны и клеточной стенки к диффузно растущей клеточной мембране, как это происходит у растений с верхушечным типом роста [23]. Поскольку МТ обеспечивают стабильность треков МФ, их разрушение должно сказываться на процессе доставки везикул, и следовательно, на стабильности роста. Однако

наши измерения не выявили большой разницы длины и ширины клеток в контроле. Это означает, что рост клеток стабилизирован даже при поврежденных МТ. Этот противоречивый факт можно объяснить довольно динамической природой актинового цитоскелета, который способен выполнять как ингибиторную, так и стимулирующую роли в экзоцитозе [12], и способен восстановить экзоцитоз и сохранить стабильность клеточного роста даже после частичного разрушения МТ.

Поскольку взаимодействие между организацией МТ и МФ существенно для регулирования растяжения клеток [5, 8, 9], следует предполагать, что оно каким-либо образом будет нарушено в условиях клиностатирования. Однако, несмотря на использование ингибиторов, мы не наблюдали видимой разницы в разрушении актинового цитоскелета, и параметры клеток выглядели более стабильными у клиностатируемых растений. Исследования *Arabidopsis*-GFP-MAP4 линии после обработки CD и оризалином также не выявили существенного расхождения размеров клеток [22]. Это означает, что при клиностатировании механизм координации роста в ДЗР действует более эффективно, чем в контроле. Таким образом, исследования, проведенные с использованием трансгенных растений *A.thaliana*-GFP-ABD2, позволило впервые проследить организацию МФ *in vivo* в клетках корня после воздействия моделированной микрогравитации (клиностатирование). Полученные данные доказывают, что МФ непосредственно не реагируют на изменение силы тяжести, однако играют существенную роль в обеспечении стабильности роста клеток в ДЗР корня проростков *Arabidopsis*. Взаимодействие МФ с организацией МТ вносит весомый вклад в этот процесс. Стабильность роста клеток в ДЗР при клиностатировании предполагает, что в условиях моделированной микрогравитации растения *Arabidopsis* используют иной механизм организации сети МФ, чем в наземном контроле. Одним из правдоподобных объяснений данного феномена может быть активность других факторов, к примеру белков, регулирующих функционирование как

МФ, так и МТ. Показано, что некоторые белки в клетках растений взаимодействуют как с микротрубочками, так и с микрофиламентами [10, 18]. Среди них — формины, известные регуляторы динамики МТ и МФ в интерфазе и митозе [13]. В данный механизм могут быть также вовлечены белки, связанные только с МФ. Так, МФ частично ответственны за распределение в клетке белков, отвечающих за ряд клеточных процессов. Среди таких белков — переносчики ауксина вовнутрь и извне клетки [16]. Известно, что циркуляция ауксина напрямую связана с гравичувствительными реакциями растений. В связи с этим функциональные исследования цитоскелетных белков, которые координированно регулируют сети компонентов цитоскелета, могут помочь лучше понять точное взаимодействие между микротрубочками и микрофиламентами.

1. Таирбеков М. Г. Гравитационная биология клетки (теория и эксперимент). — М., 1997. — 128 с.
2. Таирбеков М. Г. Вероятные механизмы гравитационной чувствительности клеток. // Докл. Акад. наук. — 2000. — 375, № 1. — С. 121 — 124.
3. Baluška F., Mancuso S., Volkmann D., Barlow P. W. Root apex transition zone: a signalling — response nexus in the root // Trends Plant Sci. — 2010. — 15, N 7. — P. 402 — 408.
4. Baluška F., Volkmann D., Barlow P. A polarity crossroad in the transition growth zone of maize root apices: cytoskeletal and developmental implications // J. Plant Growth Regul. — 2001. — 20. — P. 170—181.
5. Blancaflor E. B. Cortical actin filaments potentially interact with cortical microtubules in regulating polarity of cell expansion in primary roots of maize (*Zea mays L.*) // J. Plant Growth Regul. — 2000. — 19. — P. 406—414.
6. Blancaflor E. B. The cytoskeleton and gravitropism in higher plants // J. Plant Growth Regul. — 2002. — 21. — P. 120—136.
7. Blancaflor E. B., Wang Y-S., Motes C. M. Organization and function of the actin cytoskeleton in developing root cells // Int. Rev. Cytol. — 2006. — 252. — P. 219—264.
8. Collings D., Lill A., Himmelsbach R., Wasteneys G. Hypersensitivity to cytoskeletal antagonists demonstrates microtubule-microfilament cross-talk in the control of root elongation in *Arabidopsis thaliana* // New Phytologist. — 2006. — 170. — P. 275—290.
9. Fu Y., Gu Y., Zheung Z., Wasteneys G., Yang Z. *Arabidopsis* interdigitating cell growth requires two antagonistic pathways with opposing action on cell morphogenesis // Cell. — 2005. — 120. — P. 687—700.

10. Higaki T., Sano T., Hasezawa S. Actin microfilament dynamics and actin side-binding proteins in plants // Curr. Opin. Cell Biol. — 2007. — 10, N 6. — P. 549—556.
11. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol. — 1997. — 171. — P. 1—78.
12. Lang T., Wacker I., Wunderlich I., et al. Role of actin cortex in the subplasmalemmal transport of secretory granules in PC-12 cells // Biophys. J. — 2000. — 78. — P. 2863—2877.
13. Li Ya., Shen Yu., Cai Ch., Zhong Ch., Zhu L., Yuan M., Rena H. The type II Arabidopsis formin14 interacts with microtubules and microfilaments to regulate cell division // Plant Cell. — 2010. — 22. — P. 2710—2726.
14. Lloyd C. W., Chan J. Microtubules and the shape of plants to come // Nat. Rev. Mol. Cell Biol. — 2004. — 5. — P. 13—23.
15. Mancuso S., Marras A. M., Magnus V., Baluška F. Noninvasive and continuous recordings of auxin fluxes in intact root apex with a carbon nanotube-modified and self-referencing microelectrode // Analytical Biochemistry. — 2005. — 341. — P. 344—351.
16. Muday G. K., Murphy A. S. An emerging model of auxin transport regulation // Plant Cell. — 2002. — 14. — P. 293—299.
17. Petrašek J., Schwarzerová K. Actin and microtubule cytoskeleton interactions // Curr. Opin. Plant Biol. — 2009. — 12. — P. 728—734.
18. Saedler R., Mathur N., Srinivas B. P., et al. Actin control over microtubules suggested by DISTORTED2 encoding the *Arabidopsis* ARPC2 subunit homolog // Plant Cell Physiol. — 2004. — 45. — P. 813—822.
19. Sampathkumar A., Lindeboom J., Debolt S., et al. Live cell imaging reveals structural associations between the actin and microtubule cytoskeleton in *Arabidopsis* // Plant Cell. — 2011. — 23. — P. 2302—2313.
20. Schwab B., Mathur J., Saedler R., et al. Regulation of cell expansion by the DISTORTED genes in *Arabidopsis thaliana*: actin controls the spatial organization of microtubules // Mol. Gen. Genomics. — 2003. — 269. — P. 350—360.
21. Shevchenko G. Patterns of cortical microtubules formed in epidermis of *Beta vulgaris* roots under clinorotation // Adv. Space Res. — 1999. — 24. — P. 739—742.
22. Shevchenko G., Kalinina Ia., Kordyum E. L. Interrelation between microtubules and microfilaments in the elongation zone of *Arabidopsis* root under clinorotation // Adv. Space Res. — 2007. — 39. — P. 1171—1175.
23. Smith L. G., Oppenheimer D. G. Spatial control of cell expansion by the plant cytoskeleton // Annu. Rev. Cell Dev. Biol. — 2005. — 21. — P. 271—295.
24. Wang Y. S., Yoo C. M., Blancaflor E. B. Improved imaging of actin filaments in transgenic *Arabidopsis* plants expressing a green fluorescent protein fusion to the C- and N-termini of the fimbrin actin-binding domain // New Phytol. — 2008. — 177. — P. 525—536.
25. Wasteneys G., Galway M. Remodeling the cytoskeleton for growth and form: an overview with some new views // Annu. Rev. Plant Biol. — 2003. — 54. — P. 691—722.
26. Wasteneys G. O., Yang Z. New views on the plant cytoskeleton // Plant Physiol. — 2004. — 136. — P. 3884—3891.

Надійшла до редакції 08.10.12

G. V. Shevchenko, E. L. Kordyum

APPLICATION OF TRANSGENIC *ARABIDOPSIS THALIANA*-GFP-ABD2 PLANTS IN EXPERIMENTS FOR THE INVESTIGATION OF CYTOSKELETON IN SIMULATED MICROGRAVITY

Application of transgenic *Arabidopsis thaliana*-GFP-ABD2 plants in experiments for the study of simulated microgravity (clinorotation) impact on cytoskeleton revealed the interconnection of actin microfilaments with other cytoskeleton elements, in particular with tubulin microtubules. Investigations showed that interconnection between microfilaments and microtubules is essential for cell growth in the distal elongation zone of a root. The interconnection between cytoskeleton elements in the stationary control differs from that under clinorotation. Possible mechanism of such interconnection is discussed.

УДК 523.6

І. І. Мишишина

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

# ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ КОМЕТНОГО ЯДРА НА НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ МОДЕЛЕЙ ГАЗОПЫЛЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В СТОЛКОНОВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ АТМОСФЕРЫ

---

На основі гідродинамічного моделювання течії газопилової суміші в зіштовхувальній області кометної атмосфери зроблено спробу вивчити зв'язки між параметрами приповерхневого шару та зіштовхувальної області та оцінити реальність результатів, отриманих для течії з різним ступенем запилення. Задача є важливою для вивчення механізмів, що реалізують газопиловий зв'язок в тонкому приповерхневому шарі кометного ядра. У рамках вибраної моделі отримано залежності оптичної товщини пилової атмосфери від пилопродуктивності ядра і параметрів газу на зовнішній границі приповерхневого шару.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения показывают, что для разных комет соотношение между количеством пыли, содержащейся в голове, и газом может значительно различаться [11, 27]. Это может быть связано с различиями содержания твердых частиц, гранулометрического состава и механизмов выделения или выброса пылинок изо льда. С другой стороны, это может быть связано с динамическими характеристиками движения пылинок в атмосфере кометы. Единого подтвержденного прямым экспериментами взгляда на механизмы появления и пространственного распределения пылинок нет. Причина в сложности проблемы. Неоднократно как в теоретических [10], так и в наблюдательных работах поднимался вопрос о связи количества пыли, наблюдаемой в голове кометы, с её содержанием в ядре. Однако, как было показано в работе [19], по наблюдениям невозможно восстановить исходный состав пылевой составляющей ядра кометы. В этой ситуации важным фактором, способствующим разрешению проблемы, может стать повышение точности моделирования динамики пыли в

голове и хвосте кометы и повышение разрешающей способности принимающей аппаратуры. Дополнительную информацию можно получить из изучения динамических особенностей пылевой и газовой атмосферы.

## ВЫБОР МЕТОДИКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обобщенной характеристикой содержания пыли в голове кометы является оптическая толщина атмосферы. Вклад отдельной пылинки в оптическую толщину определяется её оптическими свойствами и временем жизни в атмосфере, а значит, скоростью движения пылинки и положением её подсолнечной точки. Поэтому вопрос о связи оптической толщины атмосферы с пылепроизводительностью кометного ядра должен решаться посредством моделирования всего газопылевого течения, так как скорости газа и пыли взаимосвязаны. Эта взаимосвязь нелинейна — газопылевое течение неадиабатично, и приток энергии к газу идет не только непосредственно путём поглощения им солнечного электромагнитного излучения, но и путём обмена с пылью энергией и импульсом, а поэтому зависит от содержания, физико-химического и размерного состава, а также скорости движения пылинок.

На сегодняшний день используются несколько принципиально отличных методов моделирования течения кометного газа, которые исторически развивались почти одновременно.

Наиболее распространенным по количеству работ и фундаментальных результатов является гидродинамический метод моделирования, который базируется на аналитическом или численном интегрировании уравнений классической механики непрерывной среды. На основании этих моделей выполняются исследования динамики газового и газо-пылевого течения и энергетического баланса. Они применимы для описания течения в столкновительной области и имеют несколько уровней сложности.

Для стационарной сферически-симметричной модели с точечным источником молекул без притока энергии было получено аналитическое решение [37]. Учет фотодиссоциации кометного газа под воздействием солнечного излучения как основного источника разогрева был проведен в работе [9], для отдельных случаев автором получены аналитические решения. На сегодня распространенным является использование гидродинамической модели, записанной в виде системы дифференциальных уравнений с граничными условиями для стационарной задачи и с начальными условиями для задачи динамической. Интегрируют систему численными методами [24–26, 28–30, 34–36]. В наиболее полных вариантах модель позволяет получать синтезированные изображения главных кометных форм для многожидкостного и многокомпонентного запыленного течения, учитывая неоднородности активных зон и полидисперсность пылинок [33], а также их сублимацию и дробление [32].

Вторым значительным направлением в моделировании кометных атмосфер является моделирование на основе молекулярно-кинетической теории [4, 14–16, 30]. Принципиальным отличием моделей этого направления от гидродинамических является то, что они не требуют локального термодинамического равновесия в среде. В столкновительной зоне моделирование на основе молекулярно-кинетической теории позволяет исследовать процессы фотохимического нагревания и термализации продуктов дис-

социации в динамике и при отсутствии сферической симметрии, процессы нарушения равновесия молекулярных составляющих, траектории отдельных молекул [3, 17, 18].

Результаты моделирования течения незапыленного кометного газа гидродинамическим методом и методом Монте-Карло (на основе молекулярно-кинетической теории) для макроскопических параметров течения сравнивались в работе [4]. Оказалось, что для макропараметров результаты моделирования в столкновительной области кометной атмосферы близки. Для радиальных профилей скорости, плотности и температуры газа нет принципиальных отличий. Количественные расхождения имеют величину, сравнимую с расхождениями из-за неопределенности граничных условий. Это позволяет сделать вывод, что гидродинамический подход воспроизводит основные процессы в нейтральной атмосфере, к тому же он позволяет без особых временных затрат исследовать влияние параметров модели. Такой же вывод сделан в работе [22] на основе обзора результатов моделирования обеими методами кометного течения с различными условиями.

Как следует из результатов исследований [6, 10, 20, 24–28, 31, 34–36], независимо от использованного подхода для мелких пылинок довольно быстро — в пределах столкновительной области — достигается некоторая зависимая от их размера «конечная» скорость. Существование такой предельной скорости в основном обусловлено быстрым падением плотности газа с расстоянием от ядра, что приводит к нарушению столкновительной газопылевой связи. В соответствии с [20] конечная скорость пылинки с определенной точностью может быть связана с ее размером  $a$  соотношением

$$\frac{d \ln V(a)}{d \ln a} = -u,$$

где  $u$  — параметр,  $V(a)$  — конечная скорость пылинок. Если  $V(a)$  определять численным решением гидродинамической задачи, то угол наклона в представленной зависимости является функцией начальной скорости пылинки и уменьшается с увеличением последней [6].

Таким образом, основные процессы, влияющие на пылесодержание кометной головы, протекают в столкновительной области её атмосферах, что даёт основание проводить исследование на основе гидродинамической модели газопылевого течения. На сегодняшний день эта модель достаточно хорошо опробована, в расчетах она проще и быстрее. На её основе с разными степенями сложности было получено большое количество фундаментальных результатов.

Как известно, модель базируется на интегрировании уравнений классической механики непрерывной среды, которые описывают законы сохранения массы, энергии и импульса. В представленном случае исследуется газопылевая среда, поэтому уравнения записываются отдельно для пыли и отдельно для газа, но с учетом их взаимодействия.

В варианте более полного соответствия реальности, необходимо включать в рассмотрение также аналогичные уравнения для продуктов диссоциации и учитывать распределение пылинок по размерам. В этом случае добавляются соответствующие уравнения для каждого размера пылинок и каждого продукта диссоциации с учетом наиболее важных их взаимодействий. Необходимо иметь в виду, что при появлении новых радикалов и молекул их распределение по скоростям и температуре могут существенно отличаться от таковых для газа из материнских молекул. Таким образом, в более общем случае, газопылевое течение в голове кометы является многокомпонентным и многожидкостным, что заметно усложняет расчет задачи и анализ результатов. Ещё можно отметить, что добавление в водяной лед другого сублимирующего вещества тоже приводит к изменению характеристик течения.

Посколько в цели работы не входило уточнение гидродинамической модели, то рассмотрен простейший вариант сферически-симметричного стационарного течения однокомпонентного нейтрального газа молекул воды с учетом его взаимодействия с пылью и электромагнитным излучением Солнца. Тогда в соответствии с [34] уравнения сохранения массы, импульса и энергии имеют вид:

а) для единицы объема газа —

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \rho_g u_g) = 0,$$

$$\rho_g u_g \frac{du_g}{dr} = - \frac{dp_g}{dr} - F_{dg},$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \rho_g u_g \left( H_g + \frac{1}{2} u_g^2 \right) \right] = Q_g - L_g + Q_{dg} - u_d F_{dg},$$

б) для пыли (пылинки не сублимируют и не дробятся) —

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_d u_d) = 0,$$

$$\rho_d u_d \frac{du_d}{dr} = F_{dg},$$

$$\rho_d u_d C_d \frac{dT_d}{dr} = -Q_{dg} + Q_{rad}.$$

Эти системы замыкаются соотношениями  $P = n_g k T_g$  и  $(4/3)\pi a^3 n_d \rho_d u_d = \chi \rho_g u_g$  на поверхности ядра. Здесь  $\chi$  — относительная пылепроизводительность,  $F_{dg} = \frac{1}{2} S_{gd} \pi a^2 \rho_g (u_g - u_d)^2 n_d$  — сила давления газа на пылинки из единицы объема,  $Q_{dg} = 4\pi a^2 C_g \rho_g (u_g - u_d) (T_d - T_r) n_d S_t$  — мощность обмена энергией между газом и пылью,  $Q_{rad} = Q_{abs} - Q_{emit}$  — разница между энергией электромагнитного излучения, поглощенной и излученной пылинкой,  $Q_g$  — мощность источников энергии от фотохимических реакций,  $L_g$  — мощность потерь энергии из-за радиационного охлаждения газа,  $H_g$  — энтальпия газа,  $C_d$  и  $\rho_d$  — удельная теплоемкость и плотность вещества пылинок,  $\rho_g$  — плотность газа,  $u_g$ ,  $u_d$  — скорости газа и пыли,  $p_g$  — давление газа,  $S_{gd}$  — свободно-молекулярный коэффициент захвата пыли газом;  $a, n_d, T_d, T_r$  — размер, концентрация, температура и равновесная в газовом потоке температура пылинок;  $S_t$  — число Стентона. Величины  $T_r$  и  $S_t$  определяются через величину  $\omega = (u_g - u_d) / \sqrt{2k T_g / m_g}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $m_g$  — масса молекулы газа:

$$T_r =$$

$$= \frac{T_g}{\gamma + 1} \left[ 2\gamma + 2(\gamma + 1)\omega^2 - \frac{\gamma - 1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{\omega^2} + \frac{\omega}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\omega)}} \exp(-\omega^2) \right],$$

$$S_t = \frac{\gamma+1}{8\gamma\omega^2} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \omega \exp(-\omega^2) + \left( \omega^2 + \frac{1}{2} \right) \operatorname{erf}(\omega) \right],$$

$\gamma$  — показатель адиабаты.

К уравнениям сохранения прибавляются уравнения переноса излучения газом и пылью (случай однократного рассеяния):

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{I}_i}{dr} &= \left( \sum_{j=1}^3 \sigma_i^j n_g + \bar{q}_i \pi a^2 n_d(r) \right) \bar{I}_i, \\ \frac{dI}{dr} &= I(r) \left[ \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) \pi a^2 n_d(r) q_d(a, \lambda, m) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) d\lambda} \right] = \\ &= I(r) \pi a^2 n_d(r) \bar{q}_d(a, m) \end{aligned}$$

в которых  $\sigma_i^j$  — сечение взаимодействия при протекании фотохимической реакции  $j$  (в работе учтены три основных канала) под воздействием излучения спектрального интервала  $i$ , усредненное по длине волны  $\lambda$  внутри этого интервала;  $n_g$  — концентрация молекул газа,  $q_d(a, \lambda, m)$  — фактор эффективности поглощения солнечного излучения пылью,  $m$  — комплексный показатель преломления вещества пылинки,  $I(\lambda)$  — спектральная мощность излучения Солнца,  $\bar{I}_i$  — средняя мощность солнечного излучения внутри спектрального интервала  $i$ ,  $\{\lambda_{\min}, \lambda_{\max}\}$  — спектральный интервал, в котором проводится интегрирование поглощенной пылью солнечной энергии.

Кроме того, что солнечную энергию в УФ-полосах газ поглощает уже ослабленную поглощением пылью, наличие пыли оказывается также на инсоляции ядра электромагнитным излучением солнечного спектра. Для количественного учета этого используется решение уравнения переноса для пыли в виде

$$I_0 = I(\infty) \exp(-\tau_d),$$

где  $\tau_d = \int_R^\infty \pi a^2 n_d(r) \bar{q}_d(a, m) dr$  — интегральная оптическая толщина пылевой атмосферы,  $R$  — радиус ядра,  $I(\infty)$  — интегральная мощность (в пределах  $\{\lambda_{\min}, \lambda_{\max}\}$ ) излучения Солнца за пределами атмосферы кометы.

В задаче о стационарном течении кометного газа система уравнений сохранения полностью описывает течение при известных граничных условиях, поэтому в модели нужно задавать значения параметров газа и пыли на поверхности, с которой начинается расчет.

В случае, когда проводится моделирование атмосферы на основе молекулярно-кинетической теории, граничные условия задаются на поверхности ядра, и при переходе в окolloядерную область значения параметров течения получаются автоматически.

При гидродинамическом моделировании, в соответствии с современными представлениями, описание газового течения на основе макропараметров следует начинать на внешней границе пристеночного слоя [5, 9]. Следовательно, именно этой границе должны соответствовать начальные значения параметров газа и пыли. При этом, если ограничиться атмосферой без ударных волн вблизи ядра, начальное число Maxa  $M_0$  не является независимой величиной, на него накладывается условие, что при переходе через звуковую точку оно должно оставаться непрерывным, т. е. производная  $dM/dr$  является конечной [9], где  $r$  — расстояние до ядра кометы.

Перенос граничных условий с ядра на внешнюю поверхность пристеночного слоя обусловлен тем, что гидродинамическое описание справедливо только для случая, когда газ находится в термодинамическом равновесии. Но даже в процессе стационарной сублимации однокомпонентного вещества с идеально гладкой плоской поверхности образуется газ в неравновесном состоянии. В процессе столкновений между молекулами изначально неравновесная функция распределения стремится к равновесной. Слой, в котором происходит максвеллизация, называется кнудсеновским. Л. М. Шульман при проведении стратификации кометных атмосфер выделил этот слой как «пристеночный слой кометного ядра» [9], он же указал, что описание течения газа в этом слое возможно только на основе молекулярно-кинетической теории.

На сегодняшний день реализовано два подхода для решения задачи о пристеночном слое на основе молекулярно-кинетической теории.

Первый из них позволяет аналитически привязать значения параметров на внешней границе слоя к значениям этих параметров на поверхности ядра без изучения структуры самого слоя. При этом определяются так называемые «скачки параметров» — отношения значений параметров на внешней границе пристеночного слоя к их значению на поверхности сублимации (поверхности ядра) [2, 13, 21]. Все результаты получены для стационарной сублимации однокомпонентного газа с однородной плоской поверхности.

Другой подход состоит в численном моделировании течения разреженного газа при помощи различных вычислительных алгоритмов. Он позволяет определить не только скачки параметров, но и структуру пристеночного слоя. Впервые численное моделирование (с такими же ограничениями, что и теоретические рассмотрения) выполнено в 1989 г. [12]. Затем была сделана попытка расширить метод на случай вытекания газопылевой смеси [5], а также были проведены расчеты для сублимации сквозь пористую мантию [7].

Следует отметить, что в задаче о пристеночном слое все еще не решена проблема выбора значения числа Маха на внешней границе пристеночного слоя [8, 23]. При аналитическом подходе его значение является дополнительным модельным допущением или свободным параметром задачи и обуславливается требованиями, которые возникают при решении внешней гидродинамической задачи. Значение местного числа Маха на выходе из приповерхностного слоя принималось равным единице в работе [2] или находилось в диапазоне 0.75—1.2 [21]. При численном подходе значение числа Маха определяется в результате расчета, что является достоинством подхода, но при этом, как отмечено в работе [8], на его значении оказывается накопление ошибок, связанных с недостаточной точностью численного моделирования, ошибку авторы оценивают в 10 %.

Основные результаты аналитических и численных работ (таблица) относятся к задаче о течении чистого незапыленного газа. С точки зрения применения к кометным атмосферам более важной является задача о пристеночном слое с

пылевой составляющей. Однако «добавление к газу пыли делает решение этой задачи крайне сложной проблемой» [4], поэтому на сегодняшний день «физические условия в поверхностной газопылевой смеси могут быть только предметом предположений» [22].

Попытка решения задачи о запыленном пристеночном слое [5] относится только к случаю слабого запыления, и является удачной в плане рассмотрения движения отдельных пылинок в неравновесном газовом потоке. Применительно же к решению, получаемому для газа в пристеночном слое, возникает вопрос сопряженности с течением в гидродинамической области. На практике неопределенность выбора начальных условий возникает из-за того, что результаты [5] приходят в противоречие с гидродинамическими представлениями о начальном числе Маха  $M_0$ , а именно, полученное в работе [5]  $M_0$  постоянно и не зависит от степени запыленности газа. В противовес этому при исследовании запыленного течения методом динамического моделирования [24] было получено подтверждение теоретических представлений о том, что начальное число Маха на внутренней границе гидродинамической области гладкого запыленного течения зависит от степени запыления и для чистого газа стремится к единице. Поэтому использование результатов [5] для скачка параметров газа в пристеночном слое при исследовании запыленной атмосферы требует осторожности, особенно когда отношение пыль/газ нельзя считать малым. По мнению авторов работы [5], это значение больше 0.5, однако выбор критериев слабой запыленности не был строго определен. Подразумевается, по-видимому, критерий слабой запыленности, который был написан Л. М. Шульманом [9], для гидродинамического течения, и который не обязательно подходит для течения в слое Кнудсена, так как последнее неравновесно. В результате подхода [5] получается, что влияние пылинок на газ в пристеночном слое исключено полностью, а влияние находящейся выше пылевой атмосферы, хотя и сохранено через влияние оптической толщины на температуру ядра, но является очень слабым. Возможно поэтому и получается, что параметры газа на выходе из

пристеночного слоя по [5] никак не связаны с пылепроизводительностью ядра.

Есть и ещё одна проблема согласованности задачи — на внутренней границе пристеночного слоя, где происходит сублимация. Наличие пыли в атмосфере означает её наличие в поверхностном слое ядра. В этом случае сублимация происходит не с однородной гладкой поверхности, и следует обратиться к задаче о сублимации с пятнистой поверхности и (или) из-под корки. Теоретические начала этой задачи заложены в работе [10]. В обширном численном исследовании [7] показано, что значения характеристик газового потока при сублимации сквозь поры могут существенно отличаться от таковых при испарении с гладкой поверхности; диапазон возможных начальных значений макропараметров при наличии неоднородностей увеличивается. При этом температура выходящего потока стремится к температуре поверхности. Ясно, что степень запылённости поверхностного слоя и его структура связаны с количеством нелетучего материала в ядре, его гранулометрическим составом и механизмами высвобождения пылинок, и что это отражается на пылепроизводительности ядра. Неопределенности же в составе и структуре поверхности ядра приводят к увеличению разброса возможных значений параметров сублимирующего газа.

В идеальном случае должны быть согласованы решения для всех слоёв задачи: поверхности фазового перехода, покрывающей (возможно) эту поверхность мантии, пристеночного слоя и столкновительной области. В реальности эти

требования на сегодняшний день выполнить невозможно.

## ПРОЦЕСС РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Так как количество параметров многослойной задачи очень велико, было проведен выбор условий, который несколько сужает неопределенности. А именно, все результаты получены для ядра размером 2.5 км, гелиоцентрического расстояния 1 а. е. и пылинок таких размеров, чтобы они по характеру движения относились к типу А [1]. Если принять модель поверхности, то тем самым на основе уравнения теплового равновесия будет определена температура сублимирующего льда, которая контролирует темп сублимации. В зависимости от модели поверхности находится также коэффициент ослабления потока сублимата. Был рассмотрен случай тонкого слоя запыления, при котором не происходит глобального подавления газопроизводительности, а температура выходящего газового потока может быть принята равной температуре свободной поверхности льда. Затем задавались скачки температуры и плотности в пристеночном слое. Они были выбраны на основе теоретических и численных результатов (таблица), для скачка плотности принято постоянное значение 0.32, так как оно по результатам исследований изменяется меньше всего, а для скачка температуры значение варьировалось в диапазоне 0.85—0.56.

В таблице приняты обозначения:  $M_0$  — число Маха на внешней поверхности пристеночного слоя, оно же начальное для гидродинамической задачи;  $n_0/n_s$  — скачок плотности, равный отно-

**Значения скачков параметров газа в пристеночном слое кометного ядра по результатам теоретических и численных исследований**

$M_0$	$n_0/n_s$	$T_0/T_s$	$Z_{\text{об}}$ , %	Состояние поверхности	Литературный источник
1.00	0.31	0.67	18	Свободная	[2]
1.15	0.34	0.56	12—14	Свободная	[12]
1.05—1.15	0.32	0.56	16	Свободная	[4]
1.05—1.15	0.35	0.60	14	Свободная	[5]
>1.0	0.5	0.72	—	Пористая	[7]
0.99	0.56	Достигает 0.9	10	Добавка 23 % минералов	[23]
0.75—1.2	0.25—0.4	0.56—0.85	20—25	Свободная	[20]

шению плотности газа на внешней поверхности пристеночного слоя к плотности на ядре (поверхности сублимации);  $T_0/T_s$  — скачок температуры, определяется аналогично; обратный поток  $Z_{ob}$  — процентное отношение конденсирующихся на ядро и испаряющихся молекул; состояние поверхности: свободная — означает оголенный лед, пористая — полностью покрытая пористой коркой, добавка 23 % минералов — объемное отношение пыли и льда в ядре.

Начальное число Маха  $M_0$  отыскивалось как свободный параметр в вычислительном процессе, исходя из условия его непрерывности в звуковой точке [9, 13]. Суть процесса следующая. Задается некоторое значение  $M_0(0)$ , в сочетании со скачком температуры ( скачок плотности постоянен) это позволяет определить начальное значение скорости газа и его эффективного расхода и произвести расчет течения до перехода через звуковую точку. Для отыскания нужного значения  $M_0$ , при котором происходит гладкий переход через точку звука, использован метод пристрелки. Определение начального отрезка проводилось методом Рунге — Кutta.

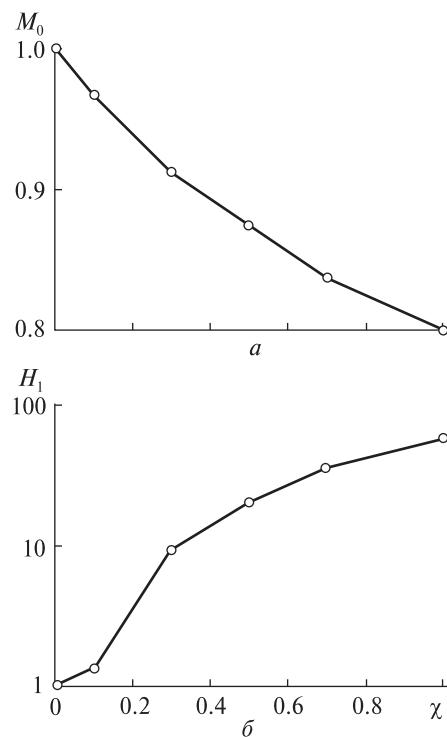
После того как звуковая точка была пройдена, параметры потока отыскивались численным решением гидродинамических уравнений в пределах столкновительной зоны. Размер столкновительной зоны кометного ядра, находящегося на гелиоцентрическом расстоянии 1 а. е., всегда оказывался достаточным, чтобы её оптическая толща исчерпывающе полно представляла всю атмосферу. В качестве нулевого приближения для оптической толщины поглощения водянымиарами в УФ-полосах использовались значения, полученные при расчетах незапыленного течения. Окончательное решение для течения получалось итерациями по атмосферам до совпадения в двух последовательных итерациях оптической толщины для пылевой атмосферы и для газа в каждой полосе.

На следующем этапе, с учетом ослабления потока на ядро, из уравнения энергетического баланса определялась равновесная температура его поверхности, и весь вычислительный процесс повторялся сначала. Таким образом, окончательное решение было получено в итеративном процессе по температуре ядра.

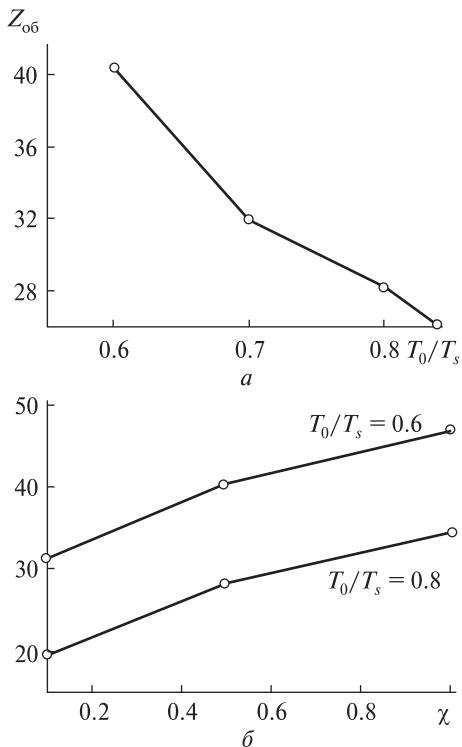
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученное по описанной методике начальное число Маха  $M_0$  и положение звуковой точки  $H_1 = H(M=1)$  показывают четкую зависимость от пылепроизводительности  $\chi$ , что можно видеть на рис. 1. Как и ожидалось, из представленных графиков следует, что течение незапыленного газа начинается с начальным числом Маха  $M_0 = 1$ . По мере увеличения запыленности начальное число Маха уменьшается, а точка звука удаляется от ядра. Подобный результат получен для всех значений скачка температуры из указанного выше диапазона.

Интересным оказалось то, что при описанном вычислительном подходе (вариации скачка температуры в интервале 0.85—0.56) проявляется сильная зависимость обратного потока молекул от скачка температуры (рис. 2, а) при постоянном  $\chi = 0.5$ , и, что важно, зависимость от запы-



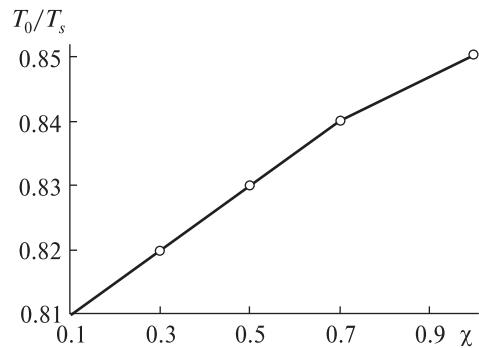
**Рис. 1.** Зависимость от пылепроизводительности кометного ядра  $\chi$ : *a* — начального числа Маха  $M_0$  газопылевого течения в столкновительной области, *б* — положения звуковой точки  $H_1 = H(M=1)$  (расстояние от поверхности сублимации в метрах)



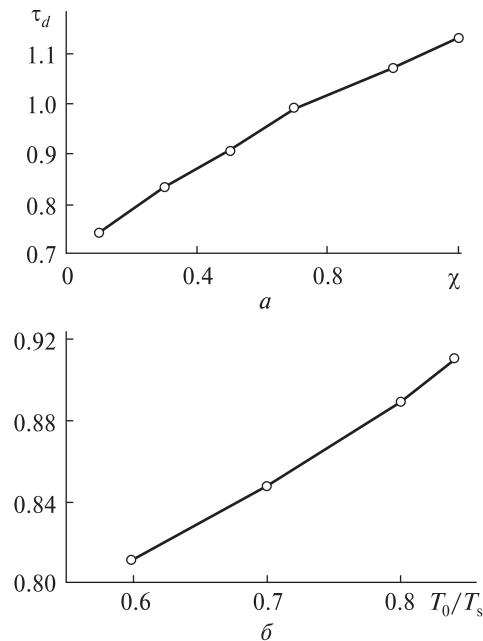
**Рис. 2.** Зависимость обратного потока молекул  $Z_{\text{об}}$ : а — от скачка температуры при постоянной пылепроизводительности ядра  $\chi = 0.5$ , б — от пылепроизводительности  $\chi$  при постоянных скачках температуры  $T_0/T_s = 0.6$  и  $0.8$

ленности при постоянном скачке температуры. Это можно видеть на рис. 2, б для двух значений скачка температуры  $T_0/T_s$  (размер частиц 1 мкм, их начальная скорость 0.5 см/с).

Такой результат может служить косвенным указанием на то, что значения параметров газа на выходе из пристеночного слоя зависят от наличия и количества пыли. Это означает, что если выставить требование, чтобы обратный поток даже в случае зависимости от запыленности, находился в пределах 17–25 %, как это приводится в литературных источниках, то при изменении запыленности газового потока должны изменяться скачки параметров на выходе из пристеночного слоя. Наиболее зависимым оказывается скачок температуры, что иллюстрирует рис. 3. Зависимость обратного потока молекул от запыленности соответствует зависимости скачка параметров от начального числа Маха — с увеличением числа Маха уменьшается скачок тем-



**Рис. 3.** Зависимость скачка температуры  $T_0/T_s$  от  $\chi$  при фиксированном значении обратного потока  $Z_{\text{об}} = 20 \%$



**Рис. 4.** Зависимость интегральной оптической толщины пылевой атмосферы: а — от пылепроизводительности кометного ядра  $\chi$ , б — от скачка температуры при фиксированном значении  $\chi = 0.5$

пературы. Эта зависимость качественно подобна представленной в работе [20], где число Маха считалось свободным параметром.

Из общих представлений вытекает, что начальное число Маха должно зависеть от пылепроизводительности, что и подтверждают представленные результаты для стационарной модели. Ранее подобный результат получен в работе [13] при исследовании запыленного течения на основе динамического моделирова-

ния, однако начальные условия выбирались на основе модели рыхлой губки, в которой фактически вводится коэффициент подавления газоприводительности, в то время как другие параметры течения соответствуют классической теории сублимации.

Графическим обобщением результатов расчетов могут послужить зависимости интегральной по видимому диапазону оптической толщины пылевой атмосферы от пылеприводительности ядра в согласованном вычислительном процессе (рис. 4, *a*) и от скачка температуры (рис. 4, *b*) при постоянном значении  $\chi = 0.5$ . Оптическая толщина пылевой атмосферы является показательным параметром, поскольку, интегрируя пылесодержание, она зависит и от состояния газовой атмосферы. Из рис. 4, *a* видно, что угол наклона почти не изменяется со степенью запыленности, т. е. при  $\chi < 0.5$  пренебрегать наличием пыли в пристеночном слое нельзя, несмотря на то что в столкновительной области такой газ может считаться слабозапыленным.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты, хотя и косвенно, говорят о том, что требование согласованности может привести к существенному изменению начальных условий для моделирования столкновительной области запыленного течения. Даже если действительно в пристеночном слое можно не принимать во внимание потерю импульса молекул из-за передачи части его пылинкам, как полагают М. Я. Маров и др. [5], то все равно исключать влияние пыли на параметры слоя нельзя. По нашему мнению, существенными могут быть другие механизмы влияния пыли на газ, например пространственное перераспределение молекул при отражении от дополнительной поверхности, которое повлияет на толщину пристеночного слоя и скачки параметров.

Моделирование в окрестности ядерной области показывает, что течение газопылевой смеси во внутренних областях кометной головы существенно зависит от содержания пыли [9, 24–26, 30, 32, 34]. Но то, насколько верно мы можем рассчитать параметры этого течения в столкновительной области — вопрос не только пылесо-

держания последней, но и вопрос о взаимном влиянии параметров столкновительной области и пристеночного слоя, то есть, о согласованности этих параметров на границах слоев.

В свою очередь, состояние пристеночного слоя зависит не только от состояния сублимирующей поверхности, но и от параметров течения газо-пылевой смеси в столкновительной области атмосферы. Это вытекает из требований согласованности и, по нашему мнению, подтверждается представленными в работе расчетами.

*This publication is based on work supported by Award No. UKG2-2969-KV-09 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation (CRDF), by the project 41/106-2012 Derzhinformnauki, M/115-2012 and 11BF051-01-12 MONmolodspot of Ukraine.*

1. Андриенко Д. А., Мишишина И. И. Особенности движения крупных частиц в кометной атмосфере // Кинематика и физика небес. тел. — 2003. — **19**, № 6. — С. 501–513.
2. Анисимов С. И. Об испарении металла, поглощающего лазерное излучение // ЖЭТФ. — 1968. — **54**, № 1. — С. 339–342.
3. Корсун П. П. Моделирование кометных атмосфер методом Монте-Карло. — Киев, 1990. — 32 с. — (Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № 74Р).
4. Маров М. Я. Физические свойства и модели комет // Астрон. вестник. — 1994. — **28**, № 4–5. — С. 5–86.
5. Маров М. Я., Колесниченко А. В., Скоров Ю. В. Численное моделирование газопылевого потока в приповерхностном слое кометной атмосферы // Астрон. вестник. — 1995. — **29**, № 3. — С. 243–252.
6. Мішишина І. Г. Особливості динаміки крупних пилинок кометних атмосфер: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 2003. — 135 с. — Машинопись.
7. Скоров Ю. В. Неравновесная кинетика разреженного газа в приистом слое кометного ядра // Астрон. вестник. — 1997. — **31**, № 1. — С. 28–42.
8. Скоров Ю. В., Королев А. Е. Пространственная структура приповерхностного слоя кометной атмосферы // Астрон. вестник. — 1998. — **32**, № 4. — С. 370–379.
9. Шульман Л. М. Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. — Киев: Наук. думка, 1972. — 243 с.
10. Шульман Л. М. Ядра комет. — М.: Наука, 1987. — 232 с.
11. A'Hearn M. F., Millis R. L., Schleicher D. G., et al. The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets. 1976 — 1992 // Icarus. — 1995. — **118**. — P. 223–270.

12. *Bisikalo D. V., Marov M. Ya., Shematovitich V. I., Strel'nikov V. S.* The flow of the sublimating gas in the near-nuclear (Knudsen) layer of the cometary coma // *Adv. Space Res.* — 1989. — **9**, N 3. — P. 53—58.
13. *Cercignani C.* Strong evaporation of a polyatomic gas // *Progr. Astronaut. and Aeronaut.* — 1981. — **74**. — P. 305—320.
14. *Combi M. R.* Neutral cometary atmospheres. III. Acceleration of cometary CN by solar radiation pressure // *Astrophys. J.* — 1980. — **241**, N 10. — P. 830—837.
15. *Combi M. R., Delsemme A. H.* Neutral cometary atmospheres. I. An average random walk model for photodissociation in comets // *Astrophys. J.* — 1980. — **237**, N 4. — P. 633—640.
16. *Combi M. R., Delsemme A. H.* Neutral cometary atmospheres. II. The production of CN in comets // *Astrophys. J.* — 1980. — **237**, N 4. — P. 641—645.
17. *Combi M. R., Smith W. H.* Monte-Carlo particle-trajectory models for neutral cometary gases. I. Models and equations // *Astrophys. J.* — 1988. — **327**, N 4. — P. 1026—1043.
18. *Combi M. R., Smith W. H.* Monte-Carlo particle-trajectory models for neutral cometary gases. II. The spatial morphology of the lyman-alfa coma // *Astrophys. J.* — 1988. — **327**, N 4. — P. 1044—1059.
19. *Cribo J. F.* Are cometary dust mass loss rates deduced from optical emissions reliable? // *Interplanetary matter / 10<sup>th</sup> European regional astronomy meeting of the IAU. 1987, August 24—29, 109.*
20. *Cribo J. F.* Optical and hydrodynamic implications of comet Halley dust size distributions, *ESA SP-278*. 1987,
21. *Cribo J. F.* Improved gas-kinetic treatment of cometary water sublimation and recondensation // *Astron. and Astrophys.* — 1987. — **187**, N 11. — P. 438—452.
22. *Cribo J. F., Fulle M., Komle N. I., Szego K.* Nucleus-coma structural relationships: Lessons from physical models. J. F. In *COMETS II* / Ed. M. Festou, H. U Keller, and H. A. Weaver. — Arizona: University of Arizona Press, 2005. — 780 p.
23. *Davidson B.* Comet Knudsen layers // *Space Sci Rev.* — 2008. — **138**. — P. 207—223.
24. *Gombosi T. I.* Dusty cometary atmospheres // *Adv. Space Res.* — 1987. — **7**, N 12. — P. 137—145.
25. *Gombosi T. I., Cravens T. E., Nady A. F.* Time-dependent dusty gasdynamical flow near cometary nuclei // *Astrophys. J.* — 1985. — **293**, N 1. — P. 328—341.
26. *Gombosi T. I., Horanyi M.* Time-dependent numerical modeling of dust halo formation at comets // *Astrophys. J.* — 1986. — **311**, N 1. — P. 491—500.
27. *Harmon J. K., Nolan M. C., Ostro S. J., Campbell D. B.* Radar studies of comet nuclei and grain comae // *COMETS II* / Ed. M. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. — Arizona: University of Arizona Press, 2005. — 780 p.
28. *Ip W. H.* On photochemical heating of cometary comae: the cases of H<sub>2</sub>O and CO-rich comets // *Astrophys. J.* — 1983. — **264**, N 2. — P. 726—732.
29. *Kitamura J.* Axisymmetric dusty gas jet in the inner coma of a comet // *Icarus*. — 1986. — **66**, N 2. — P. 241—257.
30. *Kitamura J.* Axisymmetric dusty gas jet in the inner coma of a comet. II: The case of isolated Jets // *Icarus*. — 1987. — **72**, N 3. — P. 555—567.
31. *Kitamura Y., Ashihara O., Yamamoto T.* A model for the hydrogen coma of a comet // *Icarus*. — 1985. — **61**, N 4. — P. 278—295.
32. *Knollenberg J.* Modelrechnungen zur Staubbefestigung in der inneren Koma von Kometen unter spezieller Berücksichtigung der HMC-Daten der Giotto-Mission. 1994, Ph. D. Thesis, Georg-August Universität zu Göttingen, Göttingen, Germany.
33. *Knollenberg J., Kuhrt E., Keller H.* Interpretation of HMC images by a combined thermal and gasdynamic model // *Earth, Moon, and Planets*. — 1996. — **72**, N 1-3. — P. 103—112.
34. *Marconi M. L., Mendis D. A.* The photochemistry and dynamics of a dusty cometary atmosphere // *Moon and Planets*. — 1982. — **27**, N 1. — P. 27—46.
35. *Marconi M. L., Mendis D. A.* A multi-fluid model of an H<sub>2</sub>O-dominated dusty cometary atmosphere // *Moon and Planets*. — 1982. — **27**, N 4. — P. 431—452.
36. *Marconi M. L., Mendis D. A.* Infrared heating of comet Halley's atmosphere // *Earth, Moon and Planets*. — 1986. — **36**, N 3. — P. 249—256.
37. *Wallis M. K.* Hydrodynamics of the H<sub>2</sub>O comet // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1974. — **166**. — P. 181—189.

*Надійшла до редакції 12.07.12*

### *I. I. Mischyshyna*

#### THE EFFECT OF THE DUST CONCENTRATION IN THE KNUDSEN LAYER OF A COMET ON INITIAL CONDITIONS IN MODELS OF THE DUSTY GAS FLOW IN A COMET'S ATMOSPHERE

We studied connections between the parameters of the Knudsen layer and collision region of a comet's atmosphere on the basis of the hydrodynamics simulation of the flow of gas/dust mix in the collision region. The reliability of the results derived for flows with different gas/dust relationships is estimated. The problem is important for the investigation of mechanisms realizing the gas/dust connection within the thin Knudsen layer of a comet's nuclear. Within the framework of the model proposed we derived a relationship between the optical thickness of a dusty comet's atmosphere and the dust production rate of a comet's nuclear and gas parameters on the exterior boundary of the Knudsen layer.

Н. А. Куличенко, А. В. Шульга, Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВ-КАМЕР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ

У 2011 р. у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» було розпочато спостереження метеорів у оптичному діапазоні із застосуванням телевізійних камер. Спостереження проводились із використанням програмного забезпечення, що дозволяє виділяти метеорні явища в автоматичному режимі. Представлено результати аналізу даних перших спостережень.

Повышенный интерес к изучению метеоров в оптическом диапазоне среди любителей и профессионалов, а также развитие технологий регистрации и обработки изображений обусловили появление нового и перспективного направления метеорной астрономии — телевизионные наблюдения. В качестве приемника излучения используется аппаратура на основе телевизионных ПЗС-камер, которая является особенно эффективной для наблюдений метеоров за счет большего временного разрешения по сравнению с другими методами [<http://dmsweb.home.xs4all.nl>]. В настоящее время с использованием этой аппаратуры созданы сети наблюдательных станций: IMO Video Meteor Network (IMO VMN) в рамках Международной метеорной организации (страны Западной Европы), SonotaCo Network (Япония), Polish Fireball Network (PFN, Польша) и др.

### ОБЗОР ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Оптические системы, используемые для наблюдений метеоров, подразделяются на три типа [14]:

1) видеосистемы с широким полем зрения ( $>40^\circ$  в диаметре), проникающая способность 5—7 $m$ , к ним также относятся объективы типа «рыбий глаз» и зеркальные системы для наблюдения всего неба (поле зрения 180°);

2) стандартные видеосистемы (поле зрения 10—40°), проникающая способность 7—9 $m$ ;

3) телескопические видеосистемы (поле зрения  $< 10^\circ$ ), проникающая способность лучше чем 9 $m$ . Как правило, используются светосильные и длиннофокусные объективы.

Очень часто в видеосистемах используют электронно-оптические преобразователи (ЭОП), чтобы повысить чувствительность системы [<http://dmsweb.home.xs4all.nl>, [http://www.imo.net/wiki/index.php/Video\\_Meteor\\_Observation](http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation), 11]. Наиболее распространенными ПЗС-камерами, используемыми без ЭОП, являются Mintron 12V6-EX и Watek 902H2 Ultimate, обладающие сравнительно высокой чувствительностью и низкой стоимостью. В табл. 1 приведены характеристики некоторых оптических систем, используемых в настоящее время для видеонаблюдения метеоров [6—10, 11, 12, 15, 16, <http://dmsweb.home.xs4all.nl>, [http://www.imo.net/wiki/index.php/Video\\_Meteor\\_Observation](http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation)].

### МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЕТЕОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС-КАМЕР

Переход от аналоговых видеозаписей к ПЗС-камерам существенно упростил задачу получения и обработки цифрового файла с изображением метеорного явления. В настоящее время разработаны пакеты программ, позволяющие выделять изображение метеора (как в режиме реального времени, так и оффлайн) и оценивать его астрометрические, кинематические и фотометрические характеристики [13, [http://www.imo.net/wiki/index.php/Video\\_Meteor\\_Observation](http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation)]. Наиболее широко используемыми программами являются

ся MetRec (разработчик Sirko Molau, Германия), AstroRecord (M. de Lignie, Нидерланды) и UFO Tool Suite (SonotaCo, Япония). При всех различиях между этими программами они используют ряд общих методов цифровой обработки изображений для решения следующих задач:

1) подавление помех (методы пространственного усреднения, вычитание среднего кадра, нормализация);

2) выделение метеорной траектории (группирование и установление порога, пространственная и временная корелляция).

Основные характеристики некоторых программ представлены в табл. 2.

### ТЕХНОЛОГИЯ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ «НИКОЛАЕВСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ» (НИИ НАО)

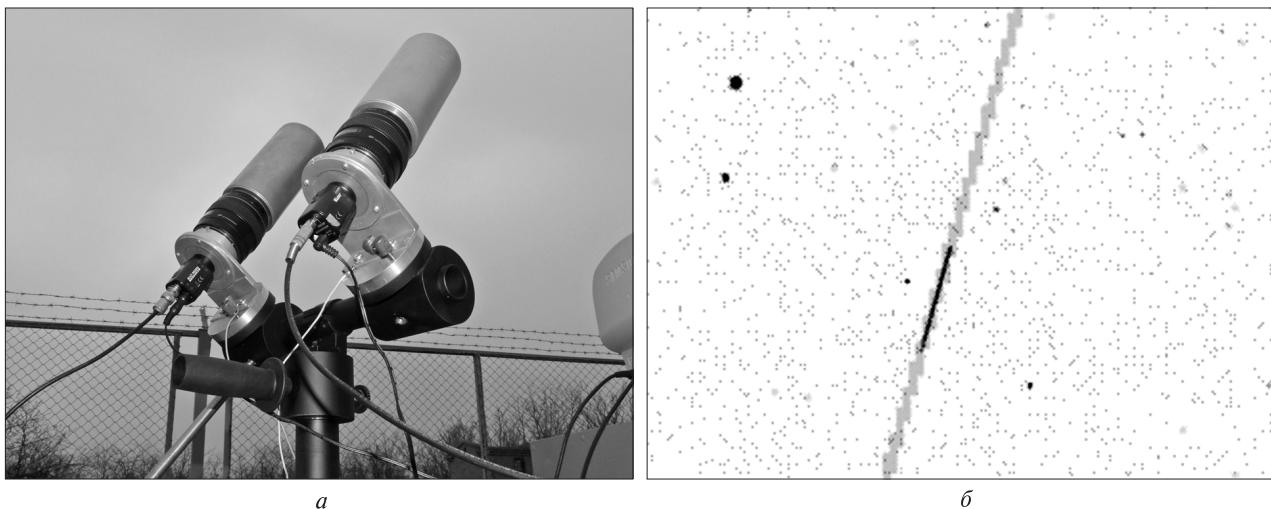
В 2011 г. в НИИ НАО введен в эксплуатацию опытный вариант метеорного телескопа (рис. 1, a), который включает два оптических телескопа ( $D = 47$  мм,  $F = 85$  мм), оснащенных ТВ-ПЗС-камерами Watec ( $768 \times 576$  пикл, 8.3 мкм). Поле зрения каждого телескопа составляет  $4.2 \times 3.2^\circ$ . Наблюдения проводятся комбинированным методом [4]. Для наблюдений используется программное обеспечение автоматической регистрации метеорных явлений с использованием

**Таблица 1. Характеристики некоторых систем видеонаблюдения метеоров**

Организация	$F$ , мм	$D$ , мм	Поле зрения	Звездная величина $m$	Наличие ЭОП
IMO VMN (Центральная Европа)	3.8—12	$f/0.8-f/1.8$	$67 \times 89^\circ$ $43 \times 57^\circ$	$3-4^m$	+/-
ИА АНРТ (Таджикистан)	50 30	$f/1.5-f/3.5$	$20 \times 30^\circ$ $180^\circ$		+ —
АО ОНУ (Украина)	540 85 8	$f/2.25$ $f/1.8$ $f/1.2$	$36 \times 48'$ $4 \times 4.5^\circ$ $36 \times 49^\circ$	$13.5^m$ $11.5^m$ $7^m$	—
Ondrejov Observatory (Чехия)	50 12	$f/1.4$ $f/1.4$	$45^\circ$ $52^\circ$	$6.5^m$ $8.0^m$	+
DMS (Нидерланды)	55 8	$f/1.2$ $f/2.8$	$25^\circ$ $180^\circ$	$7^m$ $2^m$	+
SPMN (Испания)		$f/0.8-f/1.0$	$180^\circ$	$3-4^m$	—
RASC (Канада)		$f/0.95$	$180^\circ$		—
SonotaCo (Япония)	3.8—12	$f/0.8$	$30-90^\circ$	$3-4^m$	—
CMN (Хорватия)	4	$f/1.2$	$64 \times 48^\circ$	$3.5-4^m$	—
PFN (Польша)	4	$f/1.2$	$66 \times 49^\circ$		—
CABERNET (Франция)	50	$f/1.2$	$40 \times 30^\circ$	$8.5^m$	—

**Таблица 2. Сравнение некоторых программ детектирования метеоров**

Название ПО	Режим работы	Системные требования (рекомендуемые)	Формат данных на входе	Формат данных на выходе
AstroRecord	оффлайн	Pentium PC, 600 МГц, 32 MB RAM	BMP, PCD, AVI	BMP, PCD, AVI
MetRec	онлайн	Pentium PC, 600 МГц, 32 MB RAM	Видеокамера PAL & NTSC или кассета	BMP
UFO Capture	онлайн/ оффлайн	Pentium PC, > 2.4 ГГц, > 512 MB RAM	Онлайн: PAL & NTSC с PCI-платой видеозахвата, нестандартный сигнал; Оффлайн: AVI, WMV	BMP, AVI



**Рис. 1.** Опытный экземпляр метеорного телескопа Научно-исследовательского института «Николаевская астрономическая обсерватория» (а) и пример автоматического выделения изображения метеора (б)

ТВ-камер «Meteordetect», разработанное в НИИ НАО [3]. Метод автоматического детектирования метеорных явлений заключается в выделении ячеек изображения, отношение сигнал/шум которых превышает пороговое значение по сравнению с отношением сигнал/шум этих же ячеек на предыдущих кадрах. Помимо отношения сигнал/шум анализируется также скорость объектов. Алгоритм состоит из следующих основных этапов: 1) разбиение изображения на ячейки  $8 \times 8$  пкп; 2) вычисление отношения сигнал/шум для ячеек по последовательности кадров; 3) поиск линий движения объекта среди ячеек, которые превышают пороговое значение отношения сигнал/шум; 4) поиск объектов, равномерно перемещающихся вдоль линий; 5) исключение объектов, скорость которых меньше 2 град/с, для отсеивания ИСЗ; 6) сохранение изображения. Параллельно с записью изображения метеора проводится накопление и сохранение кадров с опорными звездами. Пример автоматического выделения изображения метеора показан на рис. 1, б.

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ МЕТЕОРА

Процесс наблюдений метеоров и их обработка включают методические решения, разработанные в НИИ НАО для наблюдений космических

объектов на околоземных орбитах с применением ТВ-камер [5].

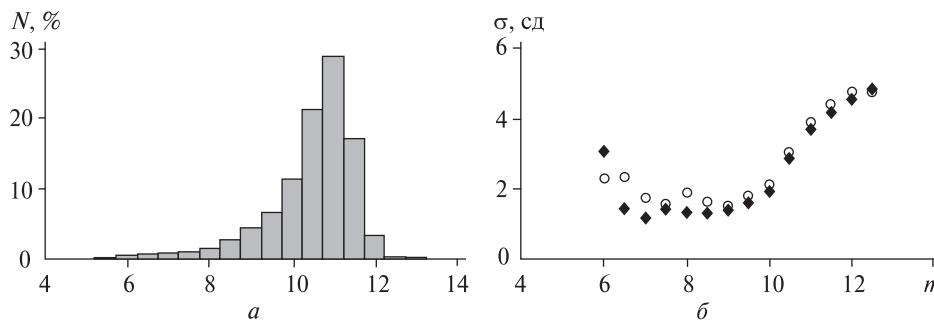
Обработка данных наблюдений включает в себя учет неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы, отождествление опорных звезд с каталогом USNO-B1.0 и расчет экваториальных координат изображений метеоров.

Учет неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы проводился путем постолбцового и построчного выравнивания фона изображения. Отождествление звезд с каталогом и расчет постоянных формулы приведения проводилось с использованием кубической модели редукции. Определение экваториальных координат изображения метеоров проводилось с использованием редукционных постоянных кадров и экваториальных координат центра изображения на момент регистрации метеорного явления [4].

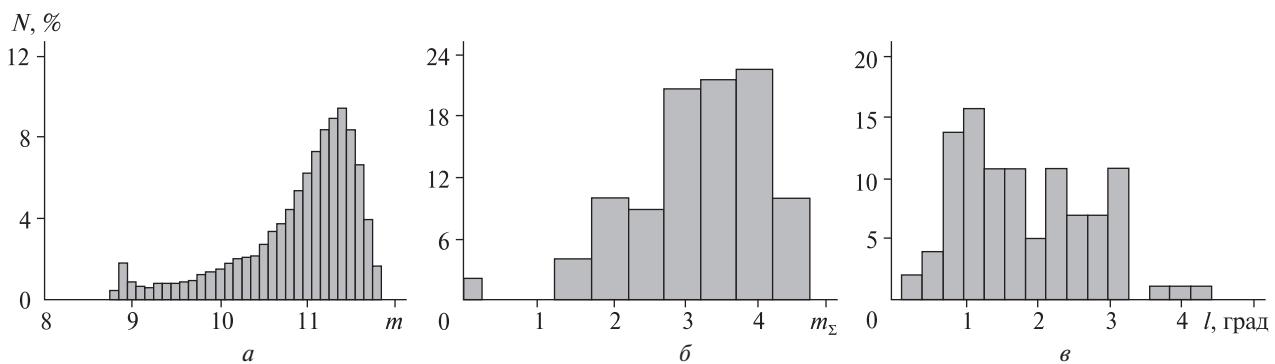
#### АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В 2011 г. на протяжении 21 ночи наблюдений метеоров было получено 105 регистраций метеорных явлений. Все данные обработаны, получены экваториальные координаты.

Для оценки методических решений, качества метеорного телескопа, а также программного обеспечения был проведен статистический и астрометрический анализ наблюдений метеоров и опорных звезд.



**Рис. 2.** Распределение количества \$N\$ опорных звезд по звездной величине \$m\$ (а) и зависимость погрешности \$\sigma\$ по прямому восхождению (ромбик) и склонению (кружки) от звездной величины \$m\$ (б)



**Рис. 3.** Распределения количества \$N\$ метеоров: а — по звездной величине \$m\$ пикселя, б — по интегральной звездной величине \$m\_\Sigma\$, в — по длине \$l\$ наблюденных дуг

Произведена оценка погрешностей измерений координат опорных звезд [4]. Распределение количества \$N\$ опорных звезд по звездным величинам \$m\$ и стандартные отклонения \$\sigma\$ оценок координат показаны на рис. 2. Видно, что для определения постоянных редукции используются звезды \$6\text{--}12''\$, погрешность координат составила \$1\text{--}6''\$.

Для оценки блеска метеора были вычислены звездные величины пикселов, составляющих метеорную траекторию. Получено распределение звездных величин для каждого пикселя, составляющего изображение метеора (рис. 3, а).

С учетом попиксельной звездной величины метеорной траектории для каждого метеора была вычислена интегральная звездная величина \$m\_\Sigma\$ по формуле

$$m_\Sigma = m_1 - 2.5 \cdot \lg(I_\Sigma / I_1),$$

где \$m\_1\$, \$I\_1\$ — звездная величина и интенсивность первого пикселя наблюденной дуги метеора, \$I\_\Sigma\$ — сумма интенсивностей пикселов наблюденной дуги метеора.

Распределения метеоров по значениям суммарных звездных величин и угловой длине изображений показаны на рис. 3, б и в соответственно. Из анализа распределения метеоров по углу наклона наблюденной дуги метеора к небесному экватору следует, что более половины метеоров имеют наклон менее \$45^\circ\$. Ориентация телескопа составляет \$243.75^\circ\$ по азимуту и \$57.6^\circ\$ по высоте и была определена с целью проведения базисных наблюдений совместно с Одесской астрономической обсерваторией. При фиксированном наведении телескопа более 90 % метеорных траекторий имеют наклон к горизонту от 30 до \$60^\circ\$.

Для оценки внутренней погрешности каждое изображение метеора аппроксимировалось линейной функцией по методу наименьших квадратов. При этом вычислялись невязки по прямому восхождению и склонению. Зависимости невязок аппроксимации от звездной величины пикселя показаны на рис. 4. Большие значения невязок по прямому восхождению характерны для метеоров с малым углом наклона метеорной траектории к небесному экватору, по склонению —

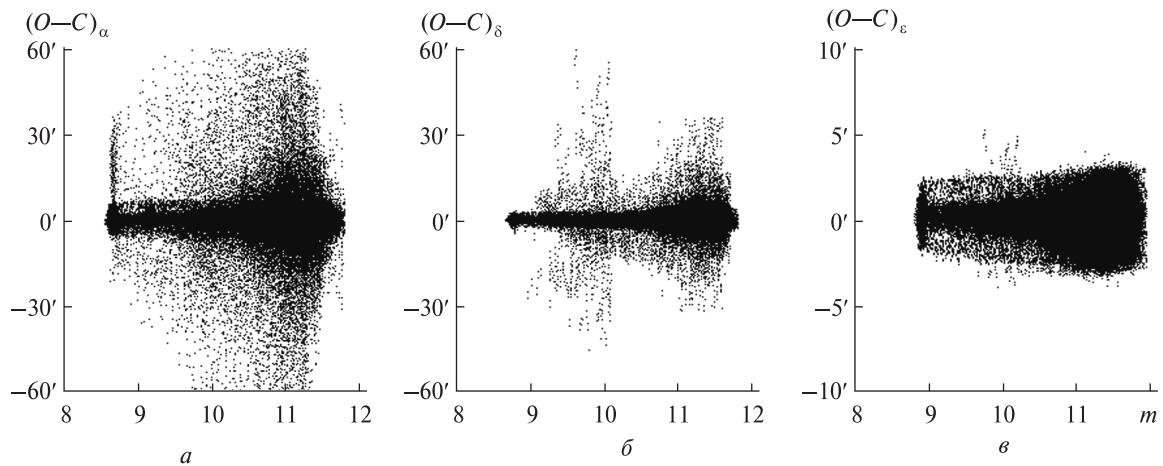


Рис. 4. Зависимость  $O-C$  от звездной величины  $m$  пикселя изображения метеора:  $a$  — по прямому восхождению,  $\delta$  — склонению,  $\epsilon$  — расстоянию  $\epsilon$  до линейного тренда

для метеоров с углом наклона метеорной траектории к небесному экватору, близким к  $90^\circ$ .

Стандартное отклонение линейного сглаживания по прямому восхождению и склонению равно соответственно  $5'$  и  $2.5'$ , что характеризует внутреннюю точность измерений в случайному отношении. Среднее значение невязок составляет  $10-12''$ . Превышение погрешности по прямому восхождению объясняется тем, что большая часть метеоров имеет малый наклон к небесному экватору. Также вычислялись величина расстояния  $\epsilon$  до линейного тренда и соответствующее стандартное отклонение, которое является средней шириной метеорной траектории и составляет около  $1'$ .

Для оценки точности определения радиантов метеорных потоков по данным наблюдений рассчитаны большие круги метеорных траекторий. Основным параметром большого круга являются координаты его полюса, которые рассчитываются по методу наименьших квадратов [1]. Уравнения, составляющие систему, имеют вид:

$$\chi \cos \alpha_i \cos \delta_i + \eta \sin \alpha_i \cos \delta_i = -\sin \delta_i,$$

где  $\alpha_i$ ,  $\delta_i$  — прямое восхождение и склонение точки.

Прямое восхождение  $A$  и склонение  $D$  полюса находятся из выражений

$$A = \arctg(\eta / \chi), \quad D = \operatorname{arcctg} \sqrt{\chi^2 + \eta^2}.$$

Погрешность определения полюса большого круга метеорной траектории не хуже  $10-13'$ .

Проанализированы зависимости погрешностей определения полюса от интегральной звездной величины метеора и от угловой длины наблюденной дуги метеора. Получены следующие аппроксимации для вычисленных значений погрешностей:

$$\delta A = 1.32' \cdot \exp(0.48m_\Sigma),$$

$$\delta D = 0.38' \cdot \exp(0.58m_\Sigma),$$

$$\delta A = 19.32' \cdot \exp[0.12(l - 0.25^\circ)^2 - 0.74(l - 0.25^\circ)],$$

$$\delta D = 8.38' \cdot \exp[0.10(l - 0.25^\circ)^2 - 0.65(l - 0.25^\circ)],$$

где  $\delta A$ ,  $\delta D$  — погрешности определения полюса большого круга метеорной траектории по прямому восхождению и склонению соответственно, в минутах дуги,  $l$  — длина наблюденной дуги метеора в градусах. По причине малого наклона траектории движения к экватору погрешность по прямому восхождению превышает погрешность по склонению.

## ВЫВОДЫ

С использованием разработанных в НИИ НАО методик и аппаратуры в Николаеве начаты наблюдения метеоров для задач метеорной опасности. Получены следующие результаты.

- По наблюдениям метеоров с мая по декабрь 2011 г. проведены тестовые испытания телевизи-

онного метеорного патруля, в результате которых получено 105 регистраций метеоров с длиной наблюденной дуги в диапазоне от 0.25—4.5° и суммарной звездной величиной 0—5<sup>m</sup>.

• Погрешность опорной системы звезд составила 1—6".

• Среднее значение невязок по прямому восхождению и склонению не хуже 10—12", а случайная погрешность координатных измерений — около 2.5—5', что для объектива и телевизионной камеры с данными характеристиками является показателем высокого качества наблюдений [2].

• Средняя ширина наблюденной дуги метеорной траектории составляет 1'.

• По данным наблюдений рассчитаны большие круги метеорных траекторий. Погрешность определения полюса большого круга метеорной траектории составила 10—13', что при сравнении с работой [2] и с поправкой на меньшее фокусное расстояние используемого объектива характеризует достаточно высокую точность.

Таким образом, была подготовлена основа для создания каталога радиантов метеорных потоков.

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958. — 640 с.
2. Горбанев Ю. М., Голубаев А. В., Жуков В. В. и др. Методика позиционных измерений телевизионных изображений телескопических метеоров // Астрон. вестник. — 2008. — **42**, № 1. — С. 37—53.
3. Козырев Е. С. Програмний продукт «Реєстрація метеорних явищ з використанням телевізійних камер» («Meteordetect») // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37593, видане 25.03.2011.
4. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов // Космическая наука и технология. — 2010. — **16**, № 5. — С. 71—76.
5. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Координатные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием режима синхронного накопления телевизионных кадров // Космическая наука и технология. — 2011. — **17**, № 3. — С. 83—87.
6. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I., Borovička J., et al. Photographic observations of fireballs in Tajikistan // Solar System Res. — 2009. — **43**, N 4. — P. 353—363.

7. Colas F., Vaubaillon J., Bouley S., et al. CABERNET network cameras for high accuracy meteor orbits determination. // EPSC-DPS Joint Meeting 2011, held 2–7 October 2011 in Nantes, France., P. 1323.
8. Connors M., Syrjasuo M., Brown P., et al. Meteor and aurora detection using modern video technologies // J. Royal Astron. Soc. Canada. — 2005. — **99**, N 1. — P. 14.
9. Gorbanev Yu. M. Odessa television meteor patrol // Odessa Astron. Publs. — 2010. — **22**. — P. 60—67.
10. Gural P., Šegon D. A new meteor detection processing approach for observations collected by the Croatian Meteor Network (CMN) // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2009. — **37**, N 1. — P. 28—32.
11. Koten P., Fliegel K., Vitek S., et al. Automatic video system for continues monitoring of the meteor activity // Earth, Moon, and Planets. — 2011. — **108**, N 1. — P. 69—76.
12. Madiedo J. M., Ortiz J. L., Castro-Tirado A., et al. On the development of robotic CCD video meteor observing stations in Spain // 41st Lunar and Planetary Science Conference, held March 1—5, 2010 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution N 1533. — P. 1504.
13. Molau S., Gural P. S. A review of video meteor detection and analysis software // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2005. — **33**, N 1. — P. 15—20.
14. Molau S., Nitschke M., de Lignie M., et al. Video observations of meteors: History, current status and future prospects // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 1997. — **25**, N 1. — P. 15.
15. Olech A., Zoladek P., Wiśniewski M., et al. Polish fireball network // Proceedings of the International Meteor Conference, Oostmalle, Belgium, 15—18 September, 2005. — P. 53—62.
16. Wiśniewski M., Olech A., Krasnowski M., et al. CCTV lenses for video meteor astronomy // WGN. Journal of the International Meteor Organization. — 2005. — **33**, N 1. — P. 23—29.

*Надійшла до редакції 02.07.12*

*N. A. Kulichenko, A. V. Shulga,  
E. S. Kozyrev, E. S. Sibiriakova*

#### **THE USE OF TV CAMERAS FOR METEOR OBSERVATIONS**

Observations of optical meteors with the use of TV cameras have begun at the Nikolaev Astronomical Observatory (RINAO) in 2011. Observations were performed using the software for extracting meteor phenomena in program mode. Some results of our analysis of first observational data are given.

УДК 528.2

Л. М. Янків-Вітковська

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

## ПРО ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ

*На основі комплексного аналізу впливу іоносфери на результати вимірювання з використанням глобальних навігаційних систем та аналізу традиційних методів врахування впливу іоносфери створено алгоритм для обчислення параметрів іоносфери STEC та VTEC для мережі вибраних перманентних станцій.*

Дослідження впливу іоносфери є важливим завданням як для координатного забезпечення в геодезії, так і для завдань часового забезпечення (синхронізація годинників, шкала часу і частоти). В наших дослідженнях основну увагу зосереджено на підвищенні точності координатного забезпечення. І тому одним із важливих фактів є врахування іоносферних похибок при супутникових спостереженнях, особливо під час надійного розв'язання фазової неоднозначності і прецизійного позиціювання сантиметрової і міліметрової точності.

Є багато моделей, які дають уявлення про розподіл електронів в іоносферному шарі [1, 3]. Відомо декілька підходів врахування впливу іоносфери, зокрема з використанням глобальних навігаційних супутниковых систем (GNSS) [2, 6].

### АКТУАЛЬНІСТЬ

Мережа мультичастотних GNSS-станцій, що працюють у режимі реального часу, дозволяє безперервно отримувати дані радіонавігаційних супутниковых вимірювань — псевдовідстані до супутників. Це дає можливість безпосереднього визначення загального вмісту електронів (ТЕС). Прикладом мережі мультичастотних GNSS-станцій, що працюють на території Західної України,

є мережа ZAKPOS/UA-EUPOS [7]. Важливість прямого визначення ТЕС на основі регулярних GNSS-спостережень полягає у тому, що це дозволяє не використовувати моделі іоносфери.

### ВІКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Працюючи із оцінками координат для мережі ZAKPOS/UA-EUPOS, ми маємо можливість оцінити вплив іоносфери лише якісно. В обчислювальному центрі мережі ZAKPOS/UA-EUPOS використовується мережеве програмне забезпечення від фірми Trimble. GNSS-інфраструктура цієї фірми на даний час має відповідні додатки, зокрема Trimble Atmosphere App, який власне і дає можливість обчислення ТЕС. Результати представляються у табличній формі, а також у різноманітних графічних формах.

Ми отримуємо дані для оцінки іоносферної корекції в певному напрямку від станції, для якої здійснюється визначення координат. На рис. 1, 2 представлено результати роботи додатку Trimble Atmosphere App для мережі ZAKPOS/UA-EUPOS. За ними можна лише обчислити вплив іоносфери на точність координатних визначень, але неможливо визначити кількісні показники параметрів іоносфери.

Рівняння для визначення загального вмісту електронів (STEC) для кодових (1) та фазових (2) спостережень мають вигляд [5]

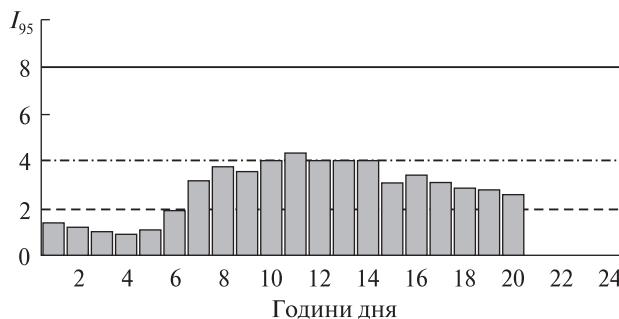


Рис. 1. Варіації іоносферного індексу  $I_{95}$  у мережі ZAKPOS протягом 1 вересня 2012 р.: сувільна лінія — висока активність іоносфери, штрих-пунктирна — середня, штрихова — нормальні активності іоносфери

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left( \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (P_{2j}^i - P_{1j}^i - b^i - b_j + \varepsilon_p), \quad (1)$$

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left( \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times \\ \times (L_{1j}^i - L_{2j}^i - B^i - B_j + \lambda_1 N_{1j}^i - \lambda_2 N_{2j}^i + \varepsilon_L)_{arc}, \quad (2)$$

де  $f_1, f_2$  — частоти GNSS-сигналів,  $P$  — псевдовідстані, визначені з кодових спостережень псевдовідстаней,  $b^i, B^i$  — затримка сигналу в  $i$ -му супутнику (так звані файли DCB),  $b_j, B_j$  — затримка сигналу на  $j$ -й станції, пов'язана з типом антени, кабеля, приймача тощо,  $\lambda$  — довжина хвилі,  $N$  — цілочисельна фазова неоднозначність,  $L$  — псевдовідстані, визначені з фазових спостережень,  $\varepsilon$  — залишкові випадкові похибки.

При використанні рівняння (1) найбільшою проблемою є згладження кодових псевдовідстаней  $P$ , а при використанні рівняння (2) — визначення фазових неоднозначностей  $N$ . Оскільки мова йде про обчислення  $TEC$  у режимі реального часу, то додаткове визначення фазових неоднозначностей дуже сильно ускладнює сам процес обчислень. Тому ми розробили практичну реалізацію рівняння (1) у системі реального часу спостережень із застосуванням спеціального алгоритму згладження.

Для початку ми створили відповідний алгоритм, за допомогою якого можна визначати значення  $TEC$  для окремої GNSS-станції у режимі реального часу. Визначення  $TEC$  відбува-

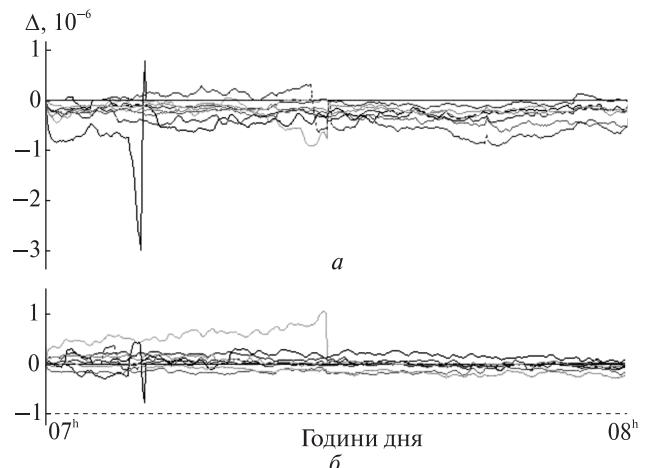


Рис. 2. Варіації іоносферної поправки  $\Delta$  для різних станцій мережі ZAKPOS від 07<sup>h</sup> до 08<sup>h</sup> 1 вересня 2012 р.: *a* — у напрямі схід — захід, *b* — у напрямі північ — півден

еться внаслідок автоматизованого опрацювання RINEX-файлів для окремої станції мережі по кожному супутниковому, що спостерігається.

Для початкового аналізу отриманих значень  $STEC$  їх, як правило, приводять до зеніту точки спостереження ( $VTEC$ ) [5]:

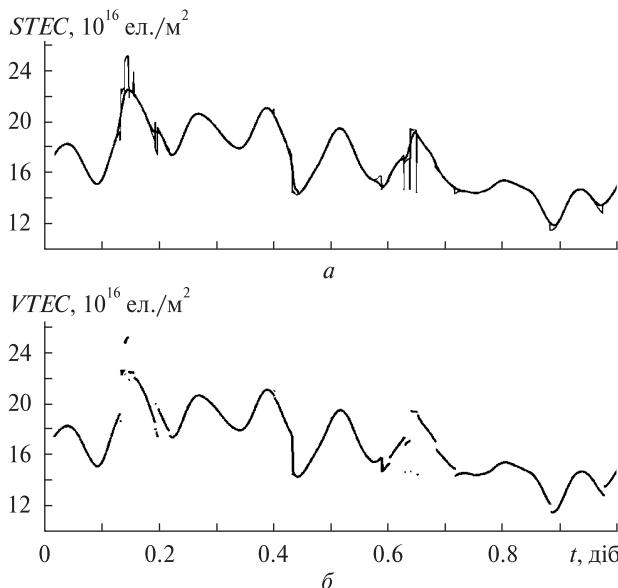
$$VTEC = M(el)^{-1} \cdot STEC, \quad (3)$$

$$M(el) = \left\{ 1 - \left[ \frac{(R + h_s) \cdot \cos(el)^2}{R + H} \right] \right\}^{-1/2}, \quad (4)$$

де  $M(el)$  — функція відображення кута місця знаходження GPS-супутника,  $el$  — кут нахилу супутника над горизонтом,  $R$  — радіус Землі,  $H$  — висота одного шару (віддалі до іоносферного шару),  $h_s$  — висота LEO-супутника (в нашому випадку  $h_s = 450$  км).

Для безпосереднього обчислення  $STEC$  та  $VTEC$  на основі формул (1), (3), (4) та розробленого спеціального алгоритму згладження кодових спостережень фазовими було створено програму на C++.

Оскільки значення  $VTEC$  і  $STEC$  отримуються щосекунди, то нами додатково розроблено програму, яка дозволяє статистично опрацювати великі масиви даних і приводити їх до зручного для подальшого аналізу виду, застосувавши при цьому специфічні методи з бібліотеки нелінійної апроксимації Matlab.



**Рис. 3.** Приклад згладження кодових спостережень  $STEC$  (а) і  $VTEC$  (б) ( $1 TEC = 10^{16}$  ел./ $m^2$ )

На рис. 3 представлено результати згладження для отриманих даних  $STEC$  та  $VTEC$ .

Дані з результатами обчислених  $STEC$  та  $VTEC$  представлені файлами на сайті станції SULP Національного університету «Львівська політехніка» <http://www.sulp.polynet.lviv.ua>.

## ВИСНОВОК

У своїх дослідженнях ми ставили завдання створити відповідний алгоритм, за допомогою якого можна визначати значення  $STEC$  та  $VTEC$  для окремої GNSS станції у режимі реального часу. Визначення  $STEC$  відбувається внаслідок автоматизованого опрацювання RINEX-файлів для окремої GNSS-станції по кожному супутнику, що спостерігається, а  $VTEC$  — шляхом їхнього приведення до зеніту.

Важливість прямого визначення  $TEC$  на основі регулярних GNSS-спостережень полягає в тому, що це дозволяє не використовувати моделі іоносфери для розв'язання сучасних задач, де вимагається висока точність результатів. Отримані нами дані  $TEC$  із безпосередніх GNSS-спостережень дозволяють моделювати іоносферні впливи на мінімально можливі проміжки часу та

отримати максимальну точність координатного забезпечення для заданого регіону.

На даний час в обробку включено лише одну станцію SULP, а в подальших планах — опрацювання даних станцій мережі ZAKPOS/UA-EUPOS з метою створення регіональної іоносферної моделі для задач координатного забезпечення.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
2. Гофман-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. — Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995. — 380 с.
3. Синкевич О. А., Стаканов И. П. Физика плазмы (стационарные процессы в частино ионизованном газе): учеб. пособие [для вузов]. — М.: Высшая. шк., 1991. — 191 с.
4. Хода О.А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+GLONAS // Космічна наука і технологія. — 2011. — № 6. — С. 45–53.
5. Key-Rok Choi, Lightsey E. G. Total Electron Content (TEC) Estimation Using GPS Measurements Onboard TerraSAR-X. Center for Space Research, The University of Texas at Austin., Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2008. — P. 923–934.
6. Klobuchar J. Ionospheric effects on GPS // GPS World. — 1991. — 2, N 4. — P. 48–54.
7. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpathian Region of Ukraine // Int. Symp. Global Navigation Satellite Systems, Spacebased and Ground-based Augmentation Systems and Applications, Berlin, 11–14 November 2008. — EUPOS Presentations.

Надійшла до редакції 12.10.12

L. M. Yankiv-Vitkovska

## ON IONOSPHERE PARAMETER CALCULATING WITH THE USE OF A SPECIAL ALGORITHM: FIRST RESULTS

An algorithm is developed to calculate the ionosphere parameters  $STEC$  and  $VTEC$  for a network of chosen permanent stations. The algorithm is elaborated on the basis of a comprehensive analysis of the ionosphere impact on measurement results with the use of global navigation systems and an analysis of traditional methods for consideration of the ionosphere influence.

УДК 528.2:629.78

**М. В. Йщенко**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## ЦЕНТР АНАЛИЗА ГНСС-ДАННЫХ ГАО НАН УКРАИНЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ РЕПРОЦЕССИНГА GPS-НАБЛЮДЕНИЙ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1236–1399

---

*Спостереження GPS-супутників на перманентних станціях, розташованих на території України та Східної Європи, оброблено за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» з використанням нових моделей та методик обробки, впроваджених Міжнародною ГНСС-службою з GPS-тижня 1400. Отримано однорідні координатні ряди в системі координат IGS05 та значення зенітної тропосферної рефракції для GPS-тижнів 1236–1399. Наведено порівняння координатної повторюваності між розв'язками репроцесингу та регулярної обробки.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.) Международная ГНСС-служба (IGS) вводит новые модели и методики обработки ГНСС-наблюдений. Рекомендовано использовать абсолютные модели вариаций фазовых центров комбинаций антенна-купол вместо относительных, модель океанической нагрузки FES2004 вместо GOT00.2\_PP и т. д. С этого же момента все продукты IGS, включая комбинированные точные эфемериды ГНСС-спутников, координаты и скорости перманентных ГНСС-станций, выражаются в системе координат IGS05 (IGS-реализация системы координат ITRF2005).

Изменения, которые были внесены в методики обработки, модели, априорные данные и программное обеспечение, привели к несогласованности полученных координатных рядов перманентных ГНСС-станций.

В 2008 г. IGS начала кампанию репроцессинга, которая была направлена на улучшение орбит GPS-спутников [13]. Наличие точных эфемерид в системе координат IGS05 позволило органи-

зоввать репроцессинг архивных данных GPS-наблюдений в Центре анализа ГАО НАН Украины. Для репроцессинга использовались рекомендации Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), вступившие в силу с GPS-недели 1400 [[http://www.epncb.oma.be/\\_organisation/guidelines/guidelines\\_analysis\\_centres.php](http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php)].

Цель данного репроцессинга — получить согласованные координатные ряды и значения зенитной тропосферной рефракции для 29 GPS-станций (прежде всего для 12 украинских GPS-станций).

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕПРОЦЕССИНГ

Репроцессинг был выполнен для GPS-недель 1236–1399 (14 сентября 2003 г.–4 ноября 2006 г.). Решение обозначено как *MA1*. Описание GPS-станций и диаграмма наблюдений приведены в работе [4].

Для получения решения использовался программный комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» [6], разработанный в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария). Данный программный комплекс позволяет обрабатывать как кодовые, так и фазовые наблю-

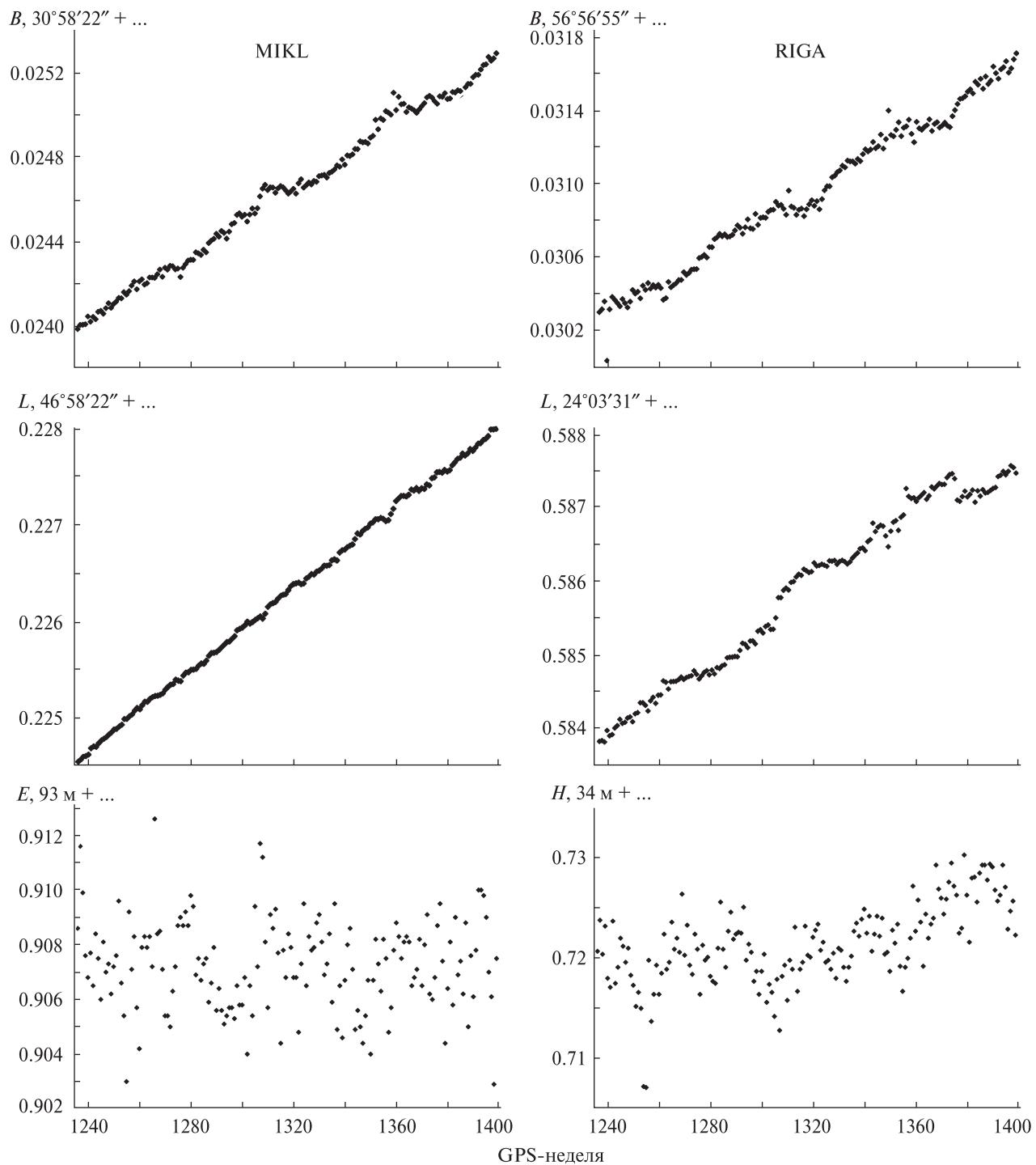
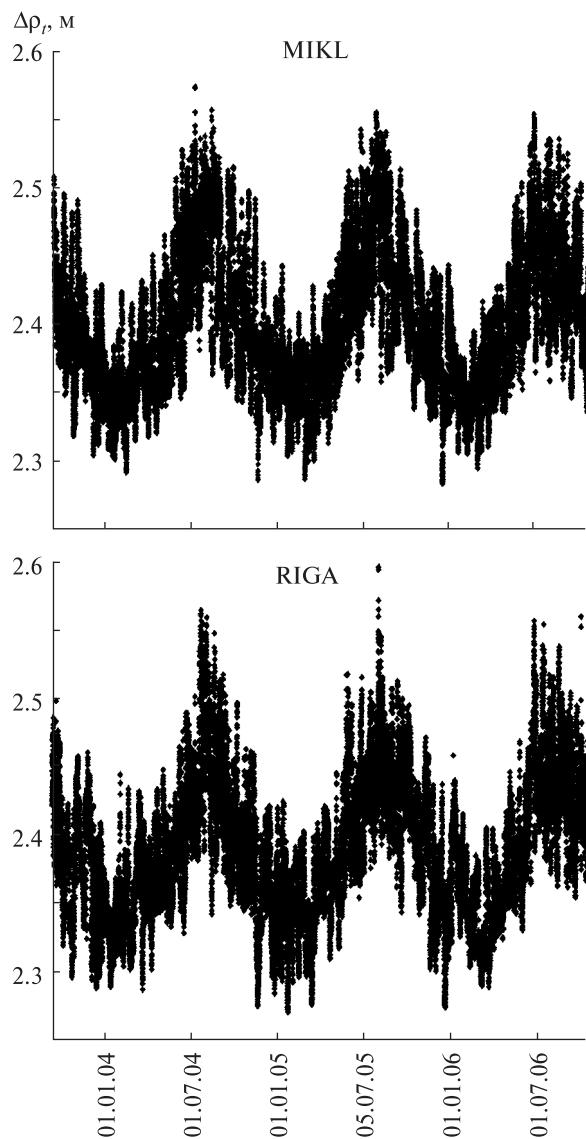


Рис. 1. Координаты GPS-станций MIKL и RIGA (широта  $B$ , долгота  $L$ , высота  $H$ )



**Рис. 2.** Значения зенитной тропосферной рефракции  $\Delta\rho$ , для GPS-станций MIKL и RIGA

дения ГНСС-спутников на пунктах локального, регионального и глобального масштабов. В результате обработки доступны координаты станций с высокой точностью, параметры орбит спутников, поправки к часам спутников и приемников, параметры тропосферной и ионосферной рефракции и т. д. С помощью модуля «Bernese Processing Engine», который входит в «Bernese GPS Software ver. 5.0», стало возможным выполнять автоматизированную обработку

сетей, состоящих из большого количества перманентных ГНСС-станций.

Для выполнения решения репроцессинга *MA1* использовались следующие модели и априорные данные.

1. Файлы наблюдений в формате RINEX, взятые на ftp-сервере Центра анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины ([ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/data](http://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/data)).

2. Комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, посчитанные в рамках кампании репроцессинга, проводимого IGS [13].

3. Координаты и скорости априорных станций на эпоху 2000.0, задающие систему координат, взяты из каталога IGS05. Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» на координаты станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 и TRAB.

4. Абсолютные модели калибровок фазовых центров антенн — купол в формате ANTEX [[http://www.iers.org/products/2/11428/orig/message\\_071.txt](http://www.iers.org/products/2/11428/orig/message_071.txt)].

5. Модель океанических нагрузок FES2004 [8].

6. Гравитационная модель JGM3 и солнечно-луные эфемериды DE200 [12].

7. Оценки разностей кодовых наблюдений, предоставленные CODE [7].

8. Тропосферная модель Саастамойнена [11], задаваемая опцией DRY\_NIELL. Для приведения значений к зениту использовать опцию NIELL функцией наклонения nmft2.0 [10]. Для использования наблюдений спутников с углом места от  $3^\circ$ , использовался тропосферный градиент [6].

9. Нутационная модель IAU2000 [9].

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на несколько этапов:

- предварительная обработка суточных сессий наблюдений,
- получение оценок координат для отдельных GPS-суток,
- получение оценок координат для отдельной GPS-недели,
- получение финальных значений зенитной тропосферной рефракции для всех GPS-станций.

Схема процесса обработки представлена на рис. 2 работы [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненного решения репроцессинга в Центре анализа ГНСС-данных получены согласованные координатные ряды в системе координат IGS05 и значения тропосферной рефракции для 29 GPS-станций для GPS-недель 1236–1399. Полученные файлы в форматах SINEX и TROPEX размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://mao.kiev.ua/pub/gps/products/IGS05>). Значения координат приводились в табл. 2 нашей работы [1]. На рис. 1 и 2 представлены изменения значений широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции для станции MIKL (Николаев, Украина), находящейся в середине сети, и для станции RIGA (Рига, Латвия), находящейся на окраине сети.

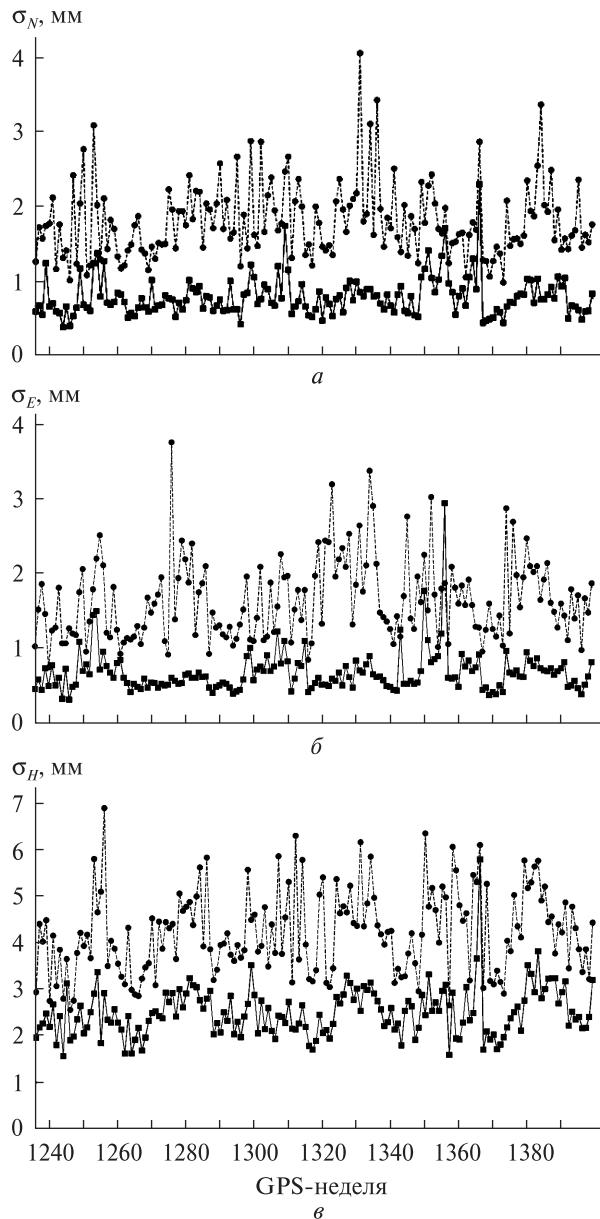
Ранее в Центре анализа ГНСС-данных была выполнена регулярная обработка наблюдений для тех же GPS-станций и того же временного периода согласно рекомендациям, действующим до GPS-недели 1400. Обработка была выполнена с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» [5]. Решение обозначено как *MAO*.

Одной из характеристик выполненного решения репроцессинга является повторяемость координат [1]. На рис. 3 изображены средние значения повторяемости координат для GPS-станций для северной, восточной и высотной составляющих для решений *MA1* и *MAO*.

Видно, что значения повторяемости координат для решений *MA1* почти в три раза меньше для северной и восточной составляющих и в два раза меньше для высотной составляющей, чем для решения *MAO*, т. е. использование улучшенных орбит GPS-спутников, новых моделей и методик обработки позволило повысить точность оценки координат GPS-станций.

## ВЫВОДЫ

С помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» выполнен репроцессинг архивных GPS-наблюдений для GPS-недель 1236–1399 и получены согласованные координатные ряды в системе координат IGS05 и значения зенитной тропосферной рефракции.



*Рис. 3.* Повторяемость координат для решений *MA1* и *MAO* (а – северная, б – восточная, в – высотная составляющие)

Использование горизонтального тропосферного градиента позволило использовать наблюдения GPS-спутников с углом места от 3°, что привело к улучшению определения параметров зенитной тропосферной рефракции.

Сравнение повторяемости координат показало, что для решения *MA1* значения почти в три

раза меньше для северной и восточной составляющей и в два раза меньше для высотной составляющей, чем для решения *MAO*.

Основной вклад в улучшение координатных рядов был внесен благодаря использованию абсолютных моделей калибровок антenna — купол (вместо относительных) [2] и улучшенных орбит GPS-спутников (кампания репроцессинга *IGS ReproI*).

Работа частично выполнена в рамках конкурсной темы «Дослідження регіональної та локальної геодинаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям за 2012 г.

1. Йщенко М. В. Оценка качества репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236—1399 // Космічна наука та технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 66—73.
2. Йщенко М. В. Репроцессинг GPS-наблюдений: влияние моделей калибровки комбинаций антenna — купол на координаты перманентных GPS-станций // Кинематика и физика небес. тел. — 2012. — **28**, № 4. — С. 76—82.
3. Хода О. А. Обработка эталонной тестовой кампании EPN в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 59—65.
4. Хода О. А. Центр анализа GPS-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPS-недель 1236—1399 // Кинематика и физика небес. тел. — 2010. — **26**, № 6. — С. 56—67.
5. Bernese GPS Software version 4.2 / Eds U. Hugentobler, S. Shaer, P. Fridez. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2001. — 515 p.
6. Bernese GPS Software version 5.0 / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.

7. Jefferson D., Heflin D., Muellerschoen R. Examining the C1-P1 pseudorange bias // GPS Solutions. — 2001. — N 4(4). — P. 25—30.
8. Lyard F., Lefvre F., Letellier T., Francis O. Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics. — 2006. — N 56. — P. 394—415.
9. McCarthy D., Petit G. IERS Conventions // IERS Technical Note 32. Bundesamt fur Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. — 2004.
10. Niell A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelenghts // J. Geophys. Res. — 1996. — **101**. — P. 3227—3246.
11. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The use of artificial satellites for Geodesy, Vol. 15 of Geophysics Monogram Series, AGU. — 1972. — P. 244—251.
12. Standish E. The Observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the astronomical almanac // Astron. and Astrophys. — 1990. — **233**, N 1. — P. 252—271.
13. Steigenberg P., Rothacher M., Fritzsche M., et al. Quality of reprocessed GPS satellite orbits // J. Geodesy. — 2009. — **83**, N 3-4. — P. 241—248.

*Надійшла до редакції 05.06.12*

*M. V. Ischenko*

#### THE GNSS DATA ANALYSIS CENTRE OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE NAS OF UKRAINE: SOME RESULTS OF OBSERVATION REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS AT PERMANENT STATIONS OF THE REGIONAL NETWORK FOR GPS WEEKS 1236-1399

Observations of GPS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe were reprocessed with the Bernese GPS Software ver. 5.0 using new models and processing procedures adopted by the International GNSS Service since GPS week 1400. Homogeneous coordinate solution in the IGS05 reference frame and the values of zenith tropospheric refraction for GPS weeks 1236—1399 are obtained. Some results of our comparison for coordinate repeatabilities between reprocessing and regular processing solutions are given.

УДК 629.78(091)

**I. Б. Вавилова<sup>1</sup>, С. С. Вавілов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> НЦ «Мала академія наук», Київ

## До 50-ї річниці польоту у космос першого космонавта-українця Павла Романовича ПОПОВИЧА



*Ми знали, що обирали. На цій дорозі немає місця для страху.  
Ми знаємо: у розвідці не можна без ризику.  
Але ми впевнені: після польоту побачимо землю і квіти на землі.  
Нап'ємося після дороги гарячого чаю і заспіваємо ще не одну пісню...  
Ніщо в житті саме не дасьється.  
І оранка, і космос вимагають зусиль, великої роботи.  
Праця, праця і праця. Лише вона приносить перемогу.*

Павло ПОПОВИЧ

(Із інтерв'ю перед стартом 12 серпня 1962 р.)

Юрій Гагарін, а за ним Герман Титов, Андріян Ніколаєв, Павло Попович, Валерій Биковський та Валентина Терешкова, — перші шість «зореплавців» у космосі, долі яких стали легендами, а космічні кораблі «Восток», на яких вони здійснили свої подорожі, стали першопрохідниками пілотованої космонавтики на Землі. Серед них гордість України, льотчик-космонавт Павло Романович Попович, на крилах якого піднялася до космічних висот споконвічна мрія українського народу, і на весь світ полинуло: «Дивлюсь я на небо та й думку гадаю...»

А на Землі тоді лунали короткі повідомлення ТАРС: «12 серпня 1962 року об 11 годині 02 хви-

лини за московським часом в Радянському Союзі на орбіту супутника Землі виведено космічний корабель «Восток-4». Корабель «Восток-4» піллотує громадянин Радянського Союзу льотчик-космонавт підполковник товариш Попович Павло Романович... Вперше за планом досліджень здійснюється спільний груповий політ у космічному просторі двох радянських кораблів «Восток-3» і «Восток-4», пілотованих громадянами Радянського Союзу товаришами Ніколаєвим Андріяном Григоровичем і Поповичем Павлом Романовичем...» На космодромі Байконур за польотом стежив Головний конструктор Сергій Павлович Корольов: «Запуск протягом двох днів двох космічних кораблів насамперед свідчить про те, що техніка, необхідна для про-



Космонавтів П. Поповича і А. Ніколаєва після завершення польоту зустрічає Москва (21 серпня 1962 р.)



Першопрохідці пілотованої космонавтики — Ю. Гагарін і П. Попович

ведення таких польотів, добре освоєна... Зараз у близькому космосі два радянські кораблі. Вони встановили зв'язок між собою. В цьому слід вбачати важливе досягнення техніки, яке відіграє велику роль у подальшому освоєнні космосу і,

зокрема, при організації зв'язку з майбутніми міжпланетними станціями».

Під час польоту Павло Романович вів щоденник, «своєрідний космічний репортаж про те, що бачив, і те, що переповнювало душу». Читаєш рядки записів і відчуваєш поетичну душу нашого земляка: «7.45. Московський час. Корабель летить над Тихим океаном. В кабіні світло вимкнуто. За бортом ніч! У правий ілюмінатор видно Землю, вкриту не суцільною хмарністю. В полі зору з'явився Місяць. Ось він, красень! На відміну від земних умов він має об'ємний вигляд, відчувається, що це куля в пустоті. Плями на ній такі самі, як і ті, що спостерігаються з Землі. Земля, точніше хмари, мають сірий колір. Корабель летить із неймовірною швидкістю у 28 тисяч кілометрів на годину. Тому картини змінюються досить швидко. У правому ілюмінаторі — зоряне небо. Воно чорне-чорне. Великі яскраві зорі видно так само, як і з Землі, тільки не мерехтять. Малі зорі видно у вигляді світлих точок. Тепер у задній ілюмінатор бачу Землю. Місяць уже в правому ілюмінаторі.

О, хвилинку! За розпорядком — другий сніданок. Мене чекає ковбаса, сандвічі та вишневий сік. Оце так! Кинув снідати, бо корабель виходить із тіні. Який краєвид! Тим, хто на Землі, цього не побачити. Оце космічні зорі! Дивіться! Горизонт у Землі яскраво-бордовий, і зразу ж темно-синя смуга без усякого плавного переходу. Потім іде ясно-блакитна смужка, що переходить у чорне небо. Ось смужка стає все ширшою, росте, розсувается, і з'являється сонечко. Горизонт стає оранжевим, блакитним, ніжнішим. Красиво!

Сонце спочатку червоне (біля Землі) і досить швидко світлішає. Світить яскраво і дуже пече. Підставиш руку — і аж обпалює. Дивитися на нього майже не можна, бо коли глянеш — осліпнеш на деякий час. Усе це відбувається швидше, ніж я пишу. Скільки вже бачив я таких зір, і кожного разу є щось нове, якісь інші відтінки.

8.45. Пролітаю над своєю Батьківчиною. Маю прекрасний зв'язок із Землею... Ах, ну й поспішаю ж я жити! За півтори години проживаю земну добу.

9.01. Корабель входить у тінь. Земля набирає спочатку ясно-синього кольору, а потім стає все

темнішою і — ніч! А Сонце ще світить хвилину-дві, і потім ховається. Темно. Лише наш вічний супутник — Місяць осяє Землю слабким світлом. До речі, там, де немає хмарності, Земля темного кольору і відрізняється від неба тим, що не має на ній зірок.

У польоті зі мною давній подарунок дружини — квіти. Вони, засушені, зберігалися вдома у книжці з 1952 року. Я розкриваю книжку: дивіться, мовляв, квіти, яка красива Земля, на якій ви зростаєте!.. Думаю я, напевно, так само, як і Андрій, зараз про одне. Під нами — планета. До Батьківщини далеко. Сотні кілометрів. Але вона — поруч. Чуємо її голос. Чуємо. Хвилюємося. Радіємо. Тріумфуємо...

Унікальний політ успішно завершено, — повідомило ТАРС 15 серпня 1962 р.: «кораблі-супутники приземлилися практично одночасно [спускний апарат «Восток-3» о 9.55, «Восток-4» — о 10.01] у заданому районі Радянського Союзу.. Пройдений шлях становить близько двох мільйонів кілометрів. У груповому космічному польоті кораблі-супутники були 71 годину. Наукові й технічні завдання найтривалішого космічного польоту і вперше здійсненого при цьому групового космічного польоту розв'язані успішно й повністю».

«Коли літав, згадував Україну, мій рідний Узин, осокори вздовж дороги, верби над Россю, хатку, де ріс, рідних, друзів. І так додому захотілося! Сиджу і мрію: от приземлюся і постараюся якомога швидше з'їздити додому. І як мені було приємно почути рідну українську мову одразу ж після приземлення. В Казахстані працює дуже багато українців, вони привітно зустрічали мене — «першого радянського космонавта з України...» У святковому вбранні, з почесним ескортом та багатолюдним урочистим мітингом зустрічала свого героя на Софійській площі столиця України. І з великою радістю, пишно, з паляницею на українському рушникові зустріло свого земляка, героя-космонавта Павла Поповича після польоту і рідне містечко Узин Білоцерківського району Київської області, де він 5 жовтня 1930 р. народився в багатодітній робітничій сім'ї Романа Порфировича і Феодосії Касянівни Поповичів.

*Він злетів до зірок, але не відірвався і на мить від цієї Землі, хоч і був дуже високо над нею*

Леонід ВІШЕСЛАВСЬКИЙ

Із Узином, де він народився 5 жовтня 1930 року, пов'язане нелегке дитинство, і день 22 червня 1941 р., коли сіли за стіл відмітити родиною його перші трудові гроші, «за пастухові старання», та почули страшне слово «війна»; і шкільні роки, що минули «за сумісництвом» із роботою на цукровому заводі; і вибір самостійного шляху, дуже рано, у 14 років, — спочатку до ремісничого училища в Білій Церкві (загітував друг, О. Компанець), а потім до індустриального технікуму у Магнітогорську. Все, здавалося б, показувало прямий шлях — на будівельний майданчик, країну потрібо віdbudovuvati!

Але на четвертому курсі технікуму запросили всіх бажаючих студентів до аероклубу. Mrія літати, що захопила Павла Поповича ще з дитинства, коли бігав на військовий аеродром на околиці Узина, спілкувався з льотчиками, відстежував, як виконують вони фігури вищого пілотажу у повітрі, вперше ставала реальністю. І сказавши тоді «так, запишіть мене», Павло Романович не знав, що перед ним рушником розстеляється ще більш далека, «зоряна дорога». Пізніше, обмірковуючи цю доленосну подію 1951 р., згадував: «Польоти захопили мене. Та головне, мабуть, інше — піднявшись у повітря, я відчув себе міцнішим, впевненішим і на Землі...»

А далі — цілковито типова кар'єра талановитого льотчика: Волгоградське авіаучилище, де зустрівся з майбутньою дружиною, теж льотчицею, Марією Васильєвою; служба у військових частинах на Далекому Сході, Закавказзі, — польоти на «ЯКах» і «МіГах», під час яких, як зізнавався, «не витримував, співав у повітрі»; чотири роки служби у північних військових гарнізонах, що засяяли святковими променями життя — зустріччю з льотчиками В. Юшкою і Б. Масленниковим, під керівництвом яких став справжнім асом, та одруженням і початком сімейного життя. Все налагоджувалося на розмірений лад. Але стався ще один поворот долі — прийшло повідомлення про нове призначення у підмосковний гарнізон. Там П. Попович почав вперше штурмувати звуковий бар'єр, літаючи до забороненої



Виступ П. Р. Поповича на церемонії відкриття пам'ятника С. П. Корольову в НТУУ КПІ, м. Київ

зони, межі з космосом. Тоді саме, у січні 1959 р., відбулася нарада в Академії наук СРСР, де було вирішено, що право першими летіти в космос серед представників різних професій мають льотчики-винищувачі.

Із цим рішенням розпочалася серйозна передкосмічна програма підготовки Павла Поповича — насамперед пройти крізь «пороги» комісії з відбору у березні 1960 р. до першого загону космонавтів. Був обраний старшиною і першим секретарем парторганізації загону. А потім — зустріч із Головним конструктором, передпольотні тренування, коли ніхто ще не володів методикою підготовки космонавтів, відбір до групи перших шести космонавтів та історичний день 12 квітня 1961 р. польоту Юрія Гагаріна, коли під час зв'язку «Зорі» (позивного всіх, хто тоді перебував біля пульту керування польотом) із «Кедром» Павло Попович був обраний представником загону космонавтів. Навіть зараз, читаючи стеноограму розмов Ю. Гагаріна із С. П. Корольовим, М. П. Каманіним та з іншими відповідальними за перший політ людини у космос, зрозумілішим стає той вибір, що впав на Павла Поповича: тільки той, хто сам завжди співав у польоті, міг запропонувати «музичну тему», щоб у такий спосіб заспокоювати свого друга, першого космонавта Землі, в останні години перед стартом. «Нібито чуттям він розумів, коли і що треба передати у моє космічне «житло». Сам він підбирав платівку, чи хто інший, але закрутіли пісеньку про лю-

зов, Утьосова, а потім іншу, мою улюблену — «Я люблю тебе, життя»... А потім ще підбадьорював, мов, «заспіваємо сьогодні увечері», згадував Юрій Гагарін. І саме Гагарін підбадьорював своїх друзів Ніколаєва, Поповича під час первого групового польоту в історії космонавтики.

Із приземленням на казахській землі для Павла Романовича на деякий час зупинилося «спокійне життя» — постали випробування славою та численними поїздками по світу (серед яких перша, у грудні 1962 р., на Кубу, де зустрічався з Ф. Кастро і Че Геварою), зйомки кінофільму «Зоряні брати» (до якого увійшли і кадри, зняті Поповичем у космосі). А потім розпочалися земні будні, — навчання в академії ім. М. Є. Жуковського і робота в Центрі підготовки космонавтів, зокрема за програмою «Інтеркосмос». Активно займався науковою і громадською діяльністю, продовжував тренуватися і готовуватися до наступних польотів, написав декілька чудових книг зі спогадами про перших космонавтів, про свій політ з А. Ніколаєвим, про успіхи радянської і американської космонавтики, в яких виявився непересічний письменницький талант Павла Поповича. Читаючи його книги, навіть у найбільших скептиків розвіювалися сумніви щодо необхідності для людства досліджені космічного простору.

Через 12 років після свого первого польоту Павло Попович знов побував у космосі — на кораблі «Союз-14» разом із космонавтом-бортінженером Ю. Артиюхіним. 5 липня 1974 р. корабель успішно стикувався з орбітальною космічною станцією (ОКС) «Салют-3», запуск якої на орбіту відбувся 26 червня 1974 р. Космонавти провели на станції 15 діб. Головною метою польоту була програма військового призначення. Серед іншого, космонавти здійснювали моніторинг хмарового шару атмосфери за міжнародною програмою досліджень Атлантичного океану, спектральні дослідження перспективних на корисні копалини районів, а також випробували нову систему енергозабезпечення станції — сонячні батареї з автономною орієнтацією на Сонце. В історії космонавтики вони залишилися єдиним екіпажем, що відвідав «Салют-3»: наступна експедиція не змогла зістикуватися зі

станцією, і було прийнято рішення про експлуатацію ОКС в автономному режимі.

Павла Романовича Поповича, двічі Героя Радянського Союзу, Героя Праці Соціалістичної Республіки В'єтнам, генерал-майора авіації, кандидата технічних наук, члена Спілки письменників України, який багато років очолював Асоціацію музеїв космонавтики Росії, завжди радо зустрічали на Батьківщині. З особливою гордістю — земляки у Білій Церкві, куди він до того ж щорічно приїжджав на боксерський турнір свого імені. Він довгі роки (з 1964 по 1988 рр.) був народним депутатом Верховної Ради СРСР від українських виборчих округів.

У місті Узині іменем Поповича названо вулицю, а на центральному майдані встановлено бюст першому українському космонавту; у бібліотеці школи № 1 відкрито музей, де зберігаються речі, подаровані космонавтом. У м. Біла Церква в ПТУ № 5, де навчався П. Р. Попович, відкрито музей космонавтики його імені. Особисті речі та експонати українця також зберігаються в Житомирському музеї космонавтики ім. С. П. Корольова, Аерокосмічному музеї ім. І. І. Сікорського в Києві, у музеї Мирного освоєння космосу в м. Переяслав-Хмельницький, у Полтавському музеї авіації і космонавтики, музеї космонавтики Міжнародного дитячого центру «Артек». У Києві на честь польоту П. Поповича і А. Ніколаєва одну із площ Солом'янського району названо Площею Космонавтів. У Гурзуфі, де 29 вересня 2009 р. перестало битися серце космонавта, на стіні будинку, де він мешкав, у 2010 р. встановлено меморіальну дошку. На честь П. Р. Поповича названо малу планету № 8444 та гірський хребет в Антарктиді.

Одна з останніх незабутніх зустрічей для багатьох, хто знав Павла Романовича Поповича, відбулася у січні 2007 р., коли він відвідав Батьків-



Зустріч родини П. Р. Поповича з президентом НАН України Б. С. Патоном з нагоди 80-річчя від дня народження П. Р. Поповича (8 жовтня 2010 р., м. Київ)

щину разом із Наталією Сергіївною Корольовою та її родиною з нагоди святкування 100-річчя від дня народження Сергія Павловича Корольова. У 2010 р. на державному рівні було відмічено 80-річчя від дня народження першого космонавта-українця, а у серпні 2011 р. — 50-річчя від часу його першого легендарного польоту. У цих ювілейних подіях почесними гостями були доньки Павла Романовича, одна з яких, Оксана Попович, очолює «Фонд підтримки авіації і космонавтики, патріотичного виховання молоді і розвитку спорту імені двічі Героя Радянського Союзу космонавта П. Р. Поповича».

«Якщо б людство замислилось над питанням «Як вижити?», воно звернуло б особливу увагу на космос, оскільки там — наш порятунок».

Надійшла до редакції 03.09.12

I. B. Vavylava, S. S. Vavilov

TO THE FIFTIETH ANNIVERSARY OF THE SPACE FLIGHT OF PAVLO ROMANOVYCH POPOVYCH,  
THE FIRST UKRAINIAN COSMONAUT

## НАШІ АВТОРИ

---

**АРТЕМЕНКО** Ігор Геннадійович — інженер I категорії Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — кліматологія, моделювання, аналіз ризиків, дистанційне дослідження Землі.

**БІЛОУС** Юлія Геннадіївна — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних до сліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — геоекологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах, моделювання та аналіз ризиків.

**ВАВИЛОВА** Ірина Борисівна — завідувачка лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, учений секретар Ради з космічних досліджень Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрофізика, історія науки.

**ВАВІЛОВ** Сергій Сергійович — інженер Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, провідний спеціаліст Наукового центру Малої академії наук.

Напрям науки — популяризація наукових досліджень.

**ДЕДЕНOK** Віктор Петрович — провідний науковий співробітник Харківського університету Повітряних Сил, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — адаптивна обробка інформації в складних системах.

**ДУГІН** Станіслав Сергійович — головний приладист Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

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

**ДУДНИК** Олексій Володимирович — завідувач відділу космічних досліджень Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика космічних променів, сонячно-земні зв'язки, космічне приладобудування.

**ІЩЕНКО** Марина Вікторівна — інженер першої категорії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — обробка ГНСС-спостережень.

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

Область наукових інтересів — процеси в навколоzemному космічному просторі

**КОЗИРЄВ** Євген Сергійович — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — навколоzemна астрономія.

**КОПАЧЕВСЬКИЙ** Іван Михайлович — провідний інженер Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — обробка та інтерпретація даних дистанційного зондування Землі, аналіз ризиків, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями техногенного характеру.

**КОРДЮМ** Єлизавета Львівна — завідувач відділу Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, доктор біологічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України.

Напрям науки — експериментальна біологія.

**КОРЕПАНОВ** Валерій Євгенович — заступник директора, завідувач відділу електромагнітних досліджень Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного

агентства України, доктор технічних наук, Заслужений діяч науки й техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, член редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія».

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

**КОСТЮЧЕНКО Юрій** Васильович — провідний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

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

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

**КУЛІЧЕНКО Микола** Олександрович — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — навколоземна астрономія.

**КУРБАТОВ Євген** Володимирович — інженер першої категорії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

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

**ЛУКЕНЮК Адольф** Антонович — заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

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

**МІЩИШИНА Ірина** Гнатівна — молодший науковий співробітник кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрономія та астрофізика.

**ПАРРА Пабло** — старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії політехнічного факультету Університету міста Алcala de Енарес (Іспанія), учасник реалізації космічних програм NANOSAT, MICROSAT, «Exomars» і «Solar Orbiter».

Напрям науки — розробка компонентного і модельного інженерного програмного забезпечення, будованих систем реального часу.

**ПИЛИПЕНКО Сергій** Григорович — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — процеси в навколоземному космічному просторі

**ПРЕСТО Мануел** — доцент кафедри комп’ютерної інженерії політехнічного факультету Університету міста Алкала де Енарес (Іспанія), учасник національних і міжнародних космічних дослідницьких проектів SOHO, PHOTON, FUEGO 2, NANOSAT і MICROSAT в частині розробки апаратних засобів і програмного забезпечення. Менеджер експерименту з приладом EPD місії ЄКА «Solar Orbiter».

Напрям науки — космічне приладобудування, комп’ютерні архітектури і вбудовані системи.

**САНЧЕЗ Себастіан** — доцент кафедри комп’ютерної інженерії політехнічного факультету Університету міста Алкала де Енарес (Іспанія), доктор філософії за напрямом «Телекомуникаційні технології»; учасник національних і міжнародних космічних дослідницьких проектів SOHO, PHOTON, FUEGO 2, NANOSAT, «Exomars», MICROSAT і «Solar Orbiter» в частині розробки апаратних засобів і програмного забезпечення.

Напрям науки — космічне приладобудування, вбудовані системи реального часу, мобільні роботи.

**СИБІРЯКОВА Євгенія** Сергіївна — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — навколоземна астрономія.

**СОЛОВІЙОВ Дмитро** Маркович — науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — морська гідрофізика та гідроекологія, обробка та дешифрування даних ДЗЗ.

**ТИТОВ Кирило** Германович — студент фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрям науки — створення програмного забезпечення для мікропроцесорів і ПЛІС з метою ідентифікації сортів і енергії заряджених частинок високих енергій в режимі реального часу.

**ТИМАКОВА Таїса** Гаврилівна — провідний інженер Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрям науки — проектування, розробка конструкторської документації механічних деталей і модулів, електронних друкованих плат супутникових приладів.

**ТКАЧЕНКО Андрій** Олексійович — начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Харківського

університету Повітряних Сил, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — системи супутникової навігації, обробка ГНСС-спостережень.

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

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

**ХИЖНЯК** Володимир Віталійович — начальник науково-дослідного центру проблем авіації та авіаційного пошуку і рятування Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту Міністерства надзвичайних ситуацій України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — моніторинг небезпечних природних та техногенних явищ.

**ШЕВЧЕНКО** Галина Валеріївна — старший науковий співробітник Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — експериментальна біологія.

**ШУВАЛОВ** Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної

механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, лауреат премії Національної академії наук України ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — плазмоелектродинаміка космічних апаратів, фізика плазми.

**ШУЛЬГА** Олександр Васильович — заступник директора з наукових питань, завідувач лабораторії Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — навколоземна астрономія.

**ЮЩЕНКО** Максим Володимирович — провідний інженер Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі» Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — географія, картографічна адаптація супутникових знімків, дистанційне дослідження Землі.

**ЯНКІВ-ВІТКОВСЬКА** Любов Миколаївна — докторант кафедри Вищої геодезії та астрономії Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — глобальні навігаційні супутникові системи.

# АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК

---

Адобовский В. В. — див. Рябов М. И.

Андреева О. А. — див. Зельк Я. И.

Артеменко І. Г. — див. Лялько В. І. (б)

Артеменко І. Г. — див. Костюченко Ю. В.

Белинский А. И. — див. Епишев В. П. (б)

Березовський В. Я., Літovка І. Г., Весельський С. П., Заморська Т. М., Янко Р. В. Вплив екзогенного мелатоніну на літідний та амінокислотний склад органічного матриксу кісткової тканини // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 78—82.

Білінський А. І., Вовчик Е. Б., Благодір Я. Т. Теоретичні аспекти модернізації супутникового чотиривісного монтування ЛД-2 // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 55—58.

Білокриницька Л. М., Крученіцький Г. М., Міщишина І. Г. База даних коефіцієнтів аерозольного послаблення на чотирьох довжинах хвиль за спостереженнями SAGE II // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 20—29.

Білоус Ю. Г. — див. Костюченко Ю. В.

Благодір Я. Т. — див. Білінський А. І.

Благодір Я. Т. — див. Епишев В. П. (б)

Бовчалюк А. П. — див. Яцків Я. С.

Бровченко В. В. — див. Донець В. В. (в)

Брюховецький А. Б. — див. Саваневич В. Е.

Вавилова І. Б., Вавілов С. С. 50-та річниця польоту у космос першого космонавта-українця Павла Романовича Поповича // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 81—85.

Вавілов С. С. — див. Вавилова І. Б.

Весельський С. П. — див. Березовський В. Я.

Власенко В. П. — див. Саваневич В. Е.

Вовчик Е. Б. — див. Білінський А. І.

Войцеховская А. Д. — див. Кришталь А. Н. (а)

Войцеховская А. Д. — див. Кришталь А. Н. (б)

Вольвач А. Е. — див. Рябов М. И.

Воробйов А. І. — див. Лялько В. І. (в)

Герасименко С. В. — див. Кришталь А. Н. (а)

Герасименко С. В. — див. Кришталь А. Н. (б)

Горбулин В. П., Кушнарёв А. П. Модели прогнозирования технико-экономических показателей РК и выбора оптимальной стратегии их отработки // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 66—73.

Губарь Г. А. — див. Рябов М. И.

Данилевский В. А. — див. Яцків Я. С.

Дегтярев А. В. 50 лет на космических орбитах // Космічна

наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 59—80. (а)

Дегтярев А. В., Макаров А. Л., Матвиенко С. А., Прокопов А. В., Романько В. Н. Аналіз перспектив розширення функціональних можливостей українського геостаціонарного спутника звязі // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 5—12. (б)

Деденок В. П. — див. Хижняк В. В.

Диков Е. Н. — див. Саваневич В. Е.

Донець В. В. Особенности конструкций бортовых гиперспектрометров AIS // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 5—11. (а)

Донець В. В., Муравський Л. І. Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 20—37. (б)

Донець В. В., Цымбал А. Ю., Бровченко В. В. Моноблочные конструкции бортовых и полевых гиперспектрометров // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 37—44. (в)

Донских А. И. — див. Рябов М. И.

Дугін С. С. — див. Жолобак Г. М.

Дугін С. С. — див. Лялько В. І. (в)

Дугін С. С. — див. Костюченко Ю. В.

Дудник А. В., Прето М., Курбатов Е. В., Санчез С., Тимакова Т. Г., Титов К. Г., Парра П. Малогабаритный прибор для мониторинга электронов и ядер высоких энергий в открытом космическом пространстве // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 22—34.

Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И., Мотрунич И. И., Найбауэр И. Ф., Кошкин Н. И., Белинский А. И., Мартынюк-Лотоцкий К. П., Благодір Я. Т., Лопаченко В. В., Рыхальский В. В., Рыщенко С. В., Жуковецкий А. В. Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 60—67. (б)

Епишев В. П., Климик В. У., Кудак В. И. Возмущения движения геосинхронных спутников под действием отраженного солнечного и инфракрасного излучения Земли // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 55—59. (а)

Євтушевський О. М. — див. Кравченко В. О.

- Жолобак Г. М.** — див. Лялько В. І. (б)
- Жолобак Г. М., Шпортик З. М., Сибірцева О. М., Дудін С. С.** Дослідження вегетаційних індексів червоного краю спектрів відбиття посівів озимої пшениці, вирощеної у польових умовах степової зони України // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 45—51.
- Жуковецький А. В.** — див. Епишев В. П. (б)
- Заморська Т. М.** — див. Березовський В. Я.
- Захаров І. В.** — див. Федоренко А. К.
- Зельк Я. І., Степанян Н. Н., Андреєва О. А.** Обобщенный сценарий эволюции солнечных циклов слабых фотосферных и сильных магнитных полей // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 68—73.
- Зєлік Я. І.** — див. Попов М. О.
- Іванов Ю. С.** — див. Яцків Я. С.
- Ісак І. І.** — див. Епишев В. П. (б)
- Іщенко М. В.** Оценка качества репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236—1399 // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 66—73.
- Іщенко М. В.** Центр анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины: результаты репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236—1399 // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 76—80.
- Івченко В. М.** — див. Козак Л. В. (а)
- Каблак Н. І., Савчук С. Г.** Дистанційний моніторинг атмосфери // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 20—25.
- Каневський Л. Б.** — див. Ковбасюк С. В.
- Карачун В. В.** — див. Мельник В. М.
- Киселев Н. Н.** — див. Яцків Я. С.
- Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н.** Тепловой анализ космических аппаратов с переменными на витке ориентацией и геометрической конфигурацией. Новая версия пакета программ TRASSA // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 21—30.
- Климик В. У.** — див. Епишев В. П. (а)
- Клоков І. С.** — див. Козак Л. В. (а)
- Ковбасюк С. В., Каневський Л. Б.** Метод обробки траєкторних даних для космічних об'єктів у багатопозиційному оптичному комплексі // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 38—45.
- Кожухов А. М.** — див. Саваневич В. Е.
- Козак Л. В., Івченко В. М., Одзимек А., Клоков І. С., Козак П. М., Лапчук В. П.** Оцінка енергії світіння атмосфери над грозовими розрядами // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 33—42. (а)
- Козак Л. В., Савин С. П., Луї А. Т., Чупко О. О.** Особливості турбулентних процесів в магнітосфері Землі за вимірами місії «Кластер» // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 43—54. (б)
- Козак Л. В.** — див. Пилипенко С. Г.
- Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г.** Пошук радіантів метеорних потоків за результатами базисних телевізійних спостережень 2001 та 2003 років // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 67—77.
- Козак П. М.** — див. Козак Л. В. (а)
- Козырев Е. С.** — див. Куличенко Н. А.
- Козырев Е. С.** — див. Шульга А. В.
- Копачевський І. М.** — див. Костюченко Ю. В.
- Кордюм Е. Л.** — див. Шевченко Г. В.
- Корепанов В. Е.** — див. Шувалов В. А. (а)
- Коробейникова Е. А.** — див. Кошкін Н. И.
- Костюченко Ю. В., Соловйов Д. М., Ющенко М. В., Дудін С. С., Копачевський І. М., Білоус Ю. Г., Артеменко І. Г.** Застосування даних наземних полігонних спектрометрических вимірювань для калібрування даних ДЗЗ в задачах оцінки гідрологічної безпеки // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 14—21.
- Костюченко Ю. В.** — див. Лялько В. І. (б)
- Кочубей Г. С.** — див. Шувалов В. А. (а)
- Кочубей Г. С.** — див. Шувалов В. А. (б)
- Кошкін Н. И., Коробейникова Е. А., Лопаченко В. В., Меликянц С. М., Страхова С. Л., Шакун Л. С.** О характере движения микроспутника с парусом в атмосфере («NanoSail-D») // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 31—38.
- Кошкін Н. И.** — див. Епишев В. П. (б)
- Кравченко В. О., Євтушевський О. М., Мілінєвський Г. П.** Віддалені тропосферно-стратосферні зв'язки за даними 30-річних супутникових вимірювань антарктичного озону // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 48—58.
- Криводубський В. Н.** — див. Логинов А. А.
- Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д.** К вопросу о возможности появления предвспышечных токовых слоев в хромосфере активной области Солнца // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 52—60. (а)
- Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д.** Низкопороговые неустойчивости кинетических альвеновских волн в хромосфере активной области на Солнце // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 29—40. (б)
- Крученицький Г. М.** — див. Білокриницька Л. М.
- Кручиненко В. Г.** — див. Козак П. М.
- Крючков Е. І., Федоренко А. К., Черемных О. К.** Влияние неоднородного состава верхней атмосферы на распространение акусто-гравитационных волн // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 30—36.
- Кудак В. І.** — див. Епишев В. П. (а)
- Кудак В. І.** — див. Епишев В. П. (б)
- Куклина Н. Я.** — див. Рябов М. И.
- Куличенко Н. А., Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибірякова Е. С.** Использование ТВ-камер для наблюдений метеоров // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 67—72.
- Курбатов Е. В.** — див. Дудник А. В.
- Кушнарёв А. П.** — див. Горбулин В. П.

- Лапчук В. П.** — див. Козак Л. В. (а)
- Левчик О. І.** — див. Лялько В. І. (а)
- Левчик О. І.** — див. Лялько В. І. (б)
- Літовка І. Г.** — див. Березовський В. Я.
- Логинов А. А., Черемных О. К., Криводубский В. Н., Сальников Н. Н.** Гидродинамическая модель торсионных колебаний Солнца // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 74—81.
- Лопаченко В. В.** — див. Епишев В. П. (б)
- Лопаченко В. В.** — див. Кошкін Н. І.
- Луї А. Т.** — див. Козак Л. В. (б)
- Луценюк А. А.** — див. Шувалов В. А. (а)
- Лялько В. І., Попов М. О., Федоровський О. Д., Левчик О. І.** Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» (до 20-річчя заснування) // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 83—88. (а)
- Лялько В. І., Сахацький О. І., Костюченко Ю. В., Артеменко І. Г., Жолобак Г. М., Левчик О. І., Мовчан Д. М.** Космічний моніторинг балансу парникових газів з метою уточнення їхньої інвентаризації // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 3—14. (б)
- Лялько В. І., Шпортьюк З. М., Сибирцева О. М., Дугін С. С., Воробйов А. І.** Дослідження змін вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 2. — С. 15—19. (в)
- Макаров А. Л.** О спутниковой съемке протяженных территорий сложной конфигурации // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 16—19. (а)
- Макаров А. Л.** — див. Дегтярев А. В. (б)
- Макаров А. Л., Хорошилов С. В.** Управление ориентацией солнечной батареи и передающей антенны электростанции космического базирования // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 3—9. (б)
- Маловичко П. П.** Генерация альвеновских волн в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 41—47.
- Мартынок-Лотоцкий К. П.** — див. Епишев В. П. (б)
- Матвиенко С. А.** — див. Дегтярев А. В. (б)
- Меликянц С. М.** — див. Кошкін Н. І.
- Мельник В. М., Каракун В. В.** Звуковий бар'єр і вплив потужної ударної  $N$ -хвилі на пружні конструкції апаратів класу «повітря-повітря» // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 12—23.
- Мишиневский Г. П.** — див. Яцків Я. С.
- Мищенко М. И.** — див. Яцків Я. С.
- Мищишина И. И.** Влияние концентрации пыли в пристеночном слое кометного ядра на начальные условия моделей газопылевого течения в столкновительной области атмосферы // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 57—66.
- Мілінєвський Г. П.** — див. Кравченко В. О.
- Мітіков Ю. О., Тиха М. В.** Підвищення ефективності генераторної системи надування бака з рідким киснем // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 24—28.
- Міщишина І. Г.** — див. Білокриницька Л. М.
- Мовчан Д. М.** — див. Лялько В. І. (б)
- Мотрунич И. И.** — див. Епишев В. П. (б)
- Муравський Л. И.** — див. Донец В. В. (б)
- Найбауэр И. Ф.** — див. Епишев В. П. (б)
- Одзимек А.** — див. Козак Л. В. (а)
- Парра П.** — див. Дудник А. В.
- Петухов В. Н.** — див. Яцків Я. С.
- Пилипенко С. Г., Козак Л. В.** Ветровые сдвиги в атмосфере Земли над мощными ураганами // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 43—50.
- Письменный Н. И.** — див. Шувалов В. А. (б)
- Покидайлло С. Л.** — див. Рябов М. И.
- Попов М. О.** — див. Лялько В. І. (а)
- Попов М. О., Станкевич С. А., Зелик Я. І., Шклляр С. В., Семенів О. В.** Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 59—65.
- Прето М.** — див. Дудник А. В.
- Прокопов А. В.** — див. Дегтярев А. В. (б)
- Рожило О. О.** — див. Козак П. М.
- Розенбуш В. К.** — див. Яцків Я. С.
- Романенко В. Г.** — див. Кислов А. М.
- Романко В. Н.** — див. Дегтярев А. В. (б)
- Рыхальский В. В.** — див. Епишев В. П. (б)
- Рыщенко С. В.** — див. Епишев В. П. (б)
- Рябов М. И., Вольвач А. Е., Сухарев А. Л., Донских А. И., Адабовский В. В., Куклина Н. Я., Шабалина О. А., Губарь Г. А., Покидайлло С. Л.** Временной спектр колебаний уровня Черного моря и его возможная связь с динамикой изменения положения РТ-22 КРАО как элемента европейской геодинамической РСДБ-сети // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 13—20.
- Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н., Власенко В. П.** Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 1. — С. 39—46.
- Савин С. П.** — див. Козак Л. В. (б)
- Савчук С. Г.** — див. Каблак Н. І.
- Сальников Н. Н.** — див. Логинов А. А.
- Санchez С.** — див. Дудник А. В.
- Сахачький О. І.** — див. Лялько В. І. (б)
- Семенів О. В.** — див. Попов М. О.
- Сергеев А. В.** — див. Тарадий В. К.
- Сибирякова Е. С.** — див. Шульга А. В.
- Сибирякова Е. С.** — див. Куличенко Н. А.

- Сибірцева О. М. — див. Жолобак Г. М.
- Сибірцева О. М. — див. Лялько В. І. (в)
- Синявський І. І. — див. Яцків Я. С.
- Смелята Т. Г. Оценка потоков техногенных частиц на поверхность космического аппарата «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 3. — С. 61—66.
- Соловій Д. М. — див. Костюченко Ю. В.
- Станкевич С. А. — див. Попов М. О.
- Степанян Н. Н. — див. Зельк Я. І.
- Страхова С. Л. — див. Кошкін Н. І.
- Сумарук П. В. — див. Сумарук Т. П.
- Сумарук Т. П., Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Геомагнітна активність та енергетика магнітосфери у 19—24-му циклах сонячної активності // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 3. — С. 46—51.
- Сумарук Ю. П. — див. Сумарук Т. П.
- Сухарев А. Л. — див. Рябов М. І.
- Тараадий В. К., Сергеев А. В. Наземная поддержка стартов и решение задач навигации в околоземном пространстве по данным оптических наблюдений на пике Терскол // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 1. — С. 47—54.
- Тарануха Ю. Г. — див. Козак П. М.
- Тимакова Т. Г. — див. Дудник А. В.
- Титов К. Г. — див. Дудник А. В.
- Тиха М. В. — див. Мітіков Ю. О.
- Ткаченко А. А. — див. Хижняк В. В.
- Токмак Н. А. — див. Шувалов В. А. (а)
- Токмак Н. А. — див. Шувалов В. А. (б)
- Федоренко А. К. — див. Крючков Е. І.
- Федоренко А. К., Захаров І. В. Специфічний коливальний режим в полярній термосфері // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 2. — С. 26—32.
- Федоровський О. Д. — див. Лялько В. І. (а)
- Фенченко В. Н. — див. Кислов А. М.
- Халалей М. І. — див. Шульга А. В.
- Хижняк В. В., Деденок В. П., Ткаченко А. А. Ионосферные возмущения перед сильными землетрясениями на Гаити ( $M = 7.2$ ) и в Японии ( $M = 9.0$ ) по данным спутниковых радионавигационных систем // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 35—42.
- Хода О. А. Обработка эталонной тестовой кампании EPN в центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 59—65.
- Хорошилов С. В. — див. Макаров А. Л. (б)
- Цупко О. О. — див. Козак Л. В. (б)
- Цымбал А. Ю. — див. Донец В. В. (в)
- Черемных О. К. — див. Крючков Е. І.
- Черемных О. К. — див. Логинов А. А.
- Чернозуб В. М. — див. Шульга А. В.
- Шабалина О. А. — див. Рябов М. І.
- Шакун Л. С. — див. Кошкін Н. І.
- Шаховской Д. Н. — див. Яцків Я. С.
- Шевченко Г. В., Кордюм Е. Л. Использование трансгенных растений *Arabidopsis thaliana*-GFP-ABD2 в экспериментах по изучению цитоскелета в условиях моделированной микрогравитации // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 51—57.
- Шкляр С. В. — див. Попов М. О.
- Шпортиuk З. М. — див. Жолобак Г. М.
- Шпортиuk З. М. — див. Лялько В. І. (в)
- Шувалов В. А., Корепанов В. Е., Лукенюк А. А., Токмак Н. А., Коцубей Г. С. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 5—13. (а)
- Шувалов В. А., Токмак Н. А., Письменный Н. І., Коцубей Г. С. Синергетический эффект воздействия потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета на полиимида пленки космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 3. — С. 10—19. (б)
- Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Халалей М. І., Чернозуб В. М. Мобільний комплекс телескопов НІІ НАО для наблюдений об'єктів околоземного космічного пространства // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 52—58.
- Шульга А. В. — див. Куличенко Н. А.
- Ющенко М. В. — див. Костюченко Ю. В.
- Янків-Вітковська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: Перші результати // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 73—75.
- Янко Р. В. — див. Березовський В. Я.
- Яцків Я. С., Мищенко М. І., Розенбуш В. К., Шаховской Д. Н., Синявский І. І., Милиневский Г. П., Киселев Н. Н., Иванов Ю. С., Петухов В. Н., Данилевский В. А., Бовчалюк А. П. Проект «Аэрозоль-УА»: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 3—15.

## ХРОНІКА

- 11-а Українська конференція з космічних досліджень // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 1. — С. 3—4.
- ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ (До 60-річчя від дня народження доктора технічних наук професора В. О. Пуляєва // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 2. — С. 81—82).

Укладачі  
О. В. Клименко, В. М. Клименко