



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 24
4(113)
2018

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

ДЕРЖАВНЕ
КОСМІЧНЕ
АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

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



ЗМІСТ

Динаміка та управління космічними апаратами

- Волосов В. В., Шевченко В. Н. Синтез управління угловим движением космического аппарата на основе обобщений прямого метода Ляпунова 3
- Сафронов О. В., Семон Б. Й., Неділько О. М. Математична модель оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхонь керування на рівень їхніх коливань при виникненні трансзвукового флатера 14

Дослідження Землі з космосу

- Яйлимов Б. Я., Лавренюк М. С., Шелестов А. Ю., Колотій А. В., Яйлимова Г. О., Федоров О. П. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану земного покриву 24

Космічні матеріали та технології

- Лобанов Л. М., Аснїс Ю. А., Терновий Є. Г., Шулим В. Ф., Булацев О. Р., Крюков В. А., Лікарєнко Т. О. Обладнання і технології для орбітального зварювання та ремонту трубопроводів в космосі 38

CONTENTS

Spacecraft Dynamics and Control

- Volosov V. V., Shevchenko V. M. Synthesis of control of the angular motion of a spacecraft on the basis of generalization of the direct Lyapunov method. 3
- Safronov A. V., Semon B. Y., Nedilko A. N. Mathematical model for estimation of the effect of aerodynamic aircraft control surfaces compensation on the level of their vibrations in case of transonic flutter 14

Study of the Earth from Space

- Yailymov B. Ya., Lavreniuk M. S., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Yailymova H. O., Fedorov O. P. Methods of essential variables determination for the Earth's surface state assessing 24

Space Materials and Technologies

- Lobanov L. M., Asnis E. A., Ternovoi E. G., Shulym V. F., Bulactev A. R., Kryukov V. A., Likarenko T. A. Development of technologies and equipment for orbital welding and repair of pipelines in space 38

Науки про життя в космосі

Кордюм Є. Л., Клименко О. М., Булавін І. В., Жупанов І. В., Воробйова Т. В., Рюланд Е. Ліпідні рафти рослинних клітин чутливі до впливу модульованої мікрогравітації (кліностатування) 48

Історія космічних досліджень

Рыхлова Л. В. Земля и околоземное пространство: исследования, открытия, проблемы 59

Чайка І. Ф. Олександр Засядько: місячний слід українських козацьких ракет. До 240-річчя від дня народження 65

Нова книга

Каденюк Леонід. Місія — Космос 74

Наші автори 79

Space Life Sciences

Kordyum E. L., Klymenko O., Bulavin I. V., Zhupanov I. V., Vorobyova T. M., Ruelland E. Lipid rafts in plant cells are sensitive to the influence of simulated microgravity (clinorotation) 48

History of Space Research

Rykhlova L. V. Earth and the near space: research, discoveries and problems 59

Chayka I. F. Olexander Zasyadko. The lunar track of the Ukrainian cossack rockets 65

New Book

Kadenyuk L. The mission — Space 74

Our authors 79

На першій сторінці обкладинки — вигляд карти класифікації для території України у 2017 році (див. статтю Б. Я. Яйлимов та ін. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану земного покриву)

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

У підготовці видання взяло участь Українське регіональне відділення Міжнародної академії астронавтики

Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО

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

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

Підписано до друку 25.10.2018. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 8,40.
Обл.-вид. арк. 8,82. Тираж 101 прим. Зам. № 5413.

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

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

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.003>.

УДК 629.7.705

В. В. Волосов, В. Н. Шевченко

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

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЙ ПРЯМОГО МЕТОДА ЛЯПУНОВА

Работа посвящена решению задач синтеза управления ориентацией орбитального космического аппарата (КА) на основе известных обобщений Зубова — Красовского прямого метода Ляпунова отдельных решений дифференциальных уравнений на исследование устойчивости замкнутых ограниченных множеств в их фазовом пространстве. Кинематические уравнения углового движения КА представлены дифференциальными уравнениями в векторно-матричной форме с вектором состояния в вещественном евклидовом пространстве. Элементами этого пространства являются векторы параметров Родрига — Гамильтона. Данные уравнения имеют следующие известные особенности. Одна из них состоит в том, что одной и той же заданной физической ориентации КА соответствуют два вектора состояния, компоненты которых отличаются друг от друга только знаками. Второй особенностью является наличие у дифференциальных уравнений геометрического интеграла движения — сохранения нормы вектора параметров ориентации. Отмечено, что вследствие этого решения уравнений не могут быть асимптотически устойчивыми по Ляпунову. Они могут иметь только свойство условной устойчивости. С учетом этих особенностей впервые сформулирована соответствующая постановка задачи синтеза управления ориентацией КА как задачи об условной асимптотической устойчивости решений дифференциальных уравнений или устойчивости на многообразиях. Более конкретно — как задачи об устойчивости двухточечных множеств в фазовом пространстве. Для решения задачи предложена новая негладкая кусочно-квадратичная функция Ляпунова. Получены решения задач синтеза управлений, обеспечивающих достижение и стабилизацию заданных ориентаций КА в инерциальной и орбитальной системах координат. Эффективность предложенных алгоритмов иллюстрируется компьютерным моделированием.

Ключевые слова: космический аппарат, ориентация, синтез управления, функции Ляпунова.

Введение. Математический аппарат кватернионов находит применение в программно-математическом обеспечении систем навигации и управления многими подвижными объектами, и в первую очередь объектами аэрокосмического профиля и морского флота. Их преимущества по сравнению с углами Крылова — Эйлера подробно изложены в монографии [3]. Число публикаций, посвященных применению кватернионов в различных задачах управления, постоянно воз-

растает. Отметим здесь лишь работы, содержания которых в той или иной мере посвящены исследованию устойчивости систем управления ориентацией и наиболее близки к содержанию данной статьи [6, 20, 25—27, 34].

Исследование задач управления угловым движением твердого тела при его описании дифференциальными уравнениями, вектор состояния которых составлен из компонентов кватернионов — параметров Эйлера — Родрига — Гамильтона (ЭРГ), имеет следующие особенности. Первая из них состоит в том, что одной и

той же его ориентации соответствуют два кватерниона и соответственно два вектора состояния (ВС), отличающиеся друг от друга только знаками своих компонентов. Учет этой особенности был частично рассмотрен в работах [25, 26]. Второй особенностью является наличие у дифференциальных уравнений интеграла движения — сохранения нормы ВС. Вследствие этого никакие решения уравнений не могут быть асимптотически устойчивыми по Ляпунову. Они могут иметь форму устойчивости, называемую условной асимптотической устойчивостью или устойчивостью на многообразиях [17, 22, 29]. Обе эти особенности впервые отмечались в работе [12]. Настоящая работа является ее дальнейшим развитием.

Математические модели управляемого углового движения орбитального космического аппарата. Постановка задачи исследования. Для формулировки постановки задачи и ее последующего решения будем использовать следующие правые ортогональные системы координат: связанную систему координат (ССК) $Oxyz$ с началом в точке O — центре масс космического аппарата (КА), рассматриваемого как твердое тело, и орбитальную систему координат (ОСК) $Ox_0y_0z_0$. Следуя [28], примем, что ось Oy_0 направлена по текущему радиусу-вектору с началом в центре Земли (местной вертикали). Ось Ox_0 расположена в плоскости орбиты с положительным направлением в сторону движения КА. Предполагается, что орбита КА является круговой, при этом ОСК вращается относительно инерциального пространства (относительно инерциальной системы координат (ИСК)) с постоянной угловой скоростью ω_* (орбитальной угловой скоростью), проекции которой на ее же оси имеют вид $\omega_* = (0, 0, \omega_{*3})^T$, $\omega_{*3} = -\sqrt{\mu/R^3}$ [1], где $\mu = 398600.4 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационная постоянная Земли, R — радиус орбиты. Символом T здесь и далее обозначается операция транспонирования. В качестве ИСК можно, например, выбрать ОСК, «остановленную» в некоторый момент времени $t = t_*$.

Под ориентацией КА понимается ориентация ССК относительно ОСК, в частности относительно ИСК. В качестве параметров ориента-

ции здесь используются компоненты кватернионов, равные параметрам ЭРГ.

Математическая модель управляемого углового движения КА с учетом [3, 11–13] может быть записана в виде

$$2\dot{\Lambda} = B(\Lambda)\tilde{\omega}, \quad \tilde{\omega} = \omega - S(\Lambda)\omega_*, \quad (1)$$

$$J\dot{\omega} = M_C + M_g - \tilde{\omega}J\omega. \quad (2)$$

где $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ — вектор угловой скорости КА (ССК) относительно ИСК, заданный проекциями $\omega_j, j = 1, 2, 3$ на оси ССК, $\tilde{\omega} = \omega - S(\Lambda)\omega_*$ — вектор угловой скорости КА относительно ОСК, заданный проекциями на ССК, J — симметрическая положительно определенная матрица $J = J^T > 0$ представления тензора инерции КА относительно центра масс O в ССК, удовлетворяющая условиям физической реализуемости [4]; M_C и M_g — искомый момент управления и гравитационный момент с проекциями на оси ССК соответственно.

В уравнении (1) под символом Λ понимается элемент 4-мерного евклидова векторного пространства R^4 , $\Lambda \in R^4$. Рассматривается случай, когда вектор $\Lambda^T = (\lambda_0, \lambda^T)$, $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ состоит из компонентов нормированного кватерниона (параметров ЭРГ). При этом $\lambda_0 = \cos(\vartheta/2)$, $\lambda_i = \gamma_i \sin(\vartheta/2)$, $i = 1, 2, 3$, где γ_i — направляющие косинусы мгновенной оси вращения ССК $Oxyz$ относительно ОСК $Ox_0y_0z_0$ с их координатными осями ($\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1$), $\|\Lambda\|^2 = 1$ [3, 5], ϑ — угол поворота ССК относительно ОСК вокруг этой оси, $S(\Lambda)$ — ортогональная матрица $S^{-1}(\Lambda) = S^T(\Lambda)$ направляющих косинусов осей ССК с осями ОСК, $Z_1 = S(\Lambda)Z_0$, где Z_0 и Z_1 — векторы проекций произвольного вектора Z на оси ОСК и ССК соответственно. С учетом [3, 7] матрица $S(\Lambda)$ приводится к виду

$$S(\Lambda) = \{s_1(\Lambda), s_2(\Lambda), s_3(\Lambda)\} = I_3 - 2\lambda_0 \tilde{\lambda} + 2\tilde{\lambda} \tilde{\lambda}, \quad (3)$$

где I_3 — единичная матрица, под символом $\tilde{\lambda}$ понимается кососимметричная ($\tilde{\lambda}^T = -\tilde{\lambda}$) матрица

$$\tilde{\lambda} = \begin{pmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{rank } \tilde{\lambda} = 2 \quad \forall \|\lambda\| \neq 0.$$

Тогда

$$S(\Lambda) = \begin{pmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & \lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_2\lambda_3 + \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) & \lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Заметим, что, вообще говоря, на КА действует еще возмущающий момент M_p аэродинамических сил и солнечного давления. Однако их учет привел бы к ненужному здесь загромождению изложения. Поэтому момент M_p в правой части уравнения (2) опущен. Согласно [2, 28], формулу для вычисления гравитационного момента можно представить в виде

$$M_g = 3 \frac{\mu}{R^3} \tilde{s}_2(\Lambda) J_{S_2}(\Lambda) = 3\omega_{*3}^2 \tilde{s}_2(\Lambda) J_{S_2}(\Lambda), \quad (5)$$

где $\tilde{s}_2(\Lambda)$ — кососимметричная матрица вектора-столбца $s_2(\Lambda)$ матрицы $S(\Lambda)$.

Обозначению $B(\Lambda)$ соответствует 4×3 -матрица полного ранга

$$B(\Lambda) = \begin{pmatrix} -\lambda^T \\ \lambda_0 I_3 + \tilde{\lambda} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\text{rank } B(\Lambda) = 3 \forall \|\Lambda\| \neq 0.$$

Заметим, что кинематическое уравнение углового движения КА наряду с видом (1) может быть представлено в виде

$$\dot{\Lambda} = 0.5A(\omega, \omega_*)\Lambda, \quad (7)$$

где $A(\omega, \omega_*)$ — кососимметрическая матрица

$$A(\omega, \omega_*) = -A^T(\omega, \omega_*) = \begin{pmatrix} 0 & -(\omega - \omega_*)^T \\ (\omega - \omega_*) & -(\tilde{\omega} + \tilde{\omega}_*) \end{pmatrix}.$$

Сделаем необходимое для последующего изложения замечание об одном свойстве решений уравнения (1) [12]. Вычисляя производную функции $\Lambda^T \Lambda = \|\Lambda\|^2$, в силу уравнения (1) убеждаемся, что она тождественно равна нулю. Поэтому уравнение (1) имеет первый интеграл $\|\Lambda(t)\| \equiv c$, где $c \neq 0$ — произвольное положительное число. Ему соответствует семейство концентрических сфер с центром в $\Lambda = 0$, радиусы которых определяются нормой $\|\Lambda(t_0)\|$ начальных условий решений уравнения (1) и не зависят от угловых скоростей ω , а следовательно, и от управлений M_c в уравнении (2). Из семейства сфер параметрам ЭРГ $\lambda_j(t)$, $j = 0, 1, 2, 3$ соответствует только сфера единичного радиуса $\|\Lambda\| = 1$.

Из формулы (3) непосредственно видно, что заданием вектора параметров ЭРГ $\Lambda = \Lambda_s$ полностью определяется матрица направляющих косинусов $S(\Lambda_s)$, т. е. ориентация КА относительно ОСК. При этом одной и той же матрице $S(\Lambda_s)$, а следовательно, одной и той же ориентации КА соответствуют два значения вектора параметров ориентации $\Lambda = \pm \Lambda_s$. Случаю совмещения осей ССК с осями ОСК $\vartheta = 0^\circ$ и $\vartheta = 360^\circ$, при котором $S(\Lambda_s) = I_3$, соответствуют векторы $\Lambda_s = (\pm 1, 0, 0, 0)$.

Уравнения (1), (2) математической модели углового движения КА при заданном моменте управления M_c полностью определяют эволюцию его ориентации относительно опорной системы координат, а именно ОСК или, в частности, ИСК, если в (1) формально положить $\omega_* = 0$.

Поставим задачу синтеза управления $M_c(\Lambda, \omega, \Lambda_s)$ такого, что при произвольном начальном состоянии $\Lambda_0 = \Lambda(t_0)$, $\|\Lambda_0\| = 1$, $\omega_0 = \omega(t_0)$ реализуется достижение и стабилизация произвольной ориентации, заданной матрицей $S(\Lambda_s)$, т. е. $\|S(\Lambda(t)) - S(\Lambda_s)\| \rightarrow 0$, $\|\omega(t) - \omega_s\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Заметим, что в зависимости от начальных условий при этом могут реализоваться случаи $\Lambda(t) \rightarrow \Lambda_s$ или $\Lambda(t) \rightarrow -\Lambda_s$.

Под символом ω_s понимается установившееся значение угловой скорости КА, соответствующее его постоянной ориентации $\Lambda(t) \equiv \Lambda_s$, при которой в уравнении (1) $\dot{\Lambda}(t) = 0$. При этом для отыскания значения ω_s получаем систему уравнений $B(\Lambda_s)[\omega_s - S(\Lambda_s)\omega_*] = 0$. Так как $B(\Lambda)$ — матрица полного ранга, то эта переопределенная система четырех уравнений относительно вектора ω_s совместная и имеет единственное решение $\omega_s = S(\Lambda_s)\omega_*$.

Заметим, что в постановке задачи речь идет не об асимптотической устойчивости решений дифференциальных уравнений в смысле классических определений [19, 21]. В отличие от этих определений в постановке задачи рассматриваются не произвольные начальные условия $\Lambda_0 \in R^4$, а начальные условия Λ_0 , расположенные на сфере единичного радиуса $\|\Lambda\| = 1$. Для характеристики свойств решений дифференциальных уравнений при начальных условиях, расположенных на некоторых многообразиях

их фазовых пространств, используется понятие условной асимптотической устойчивости [17, 22, 29]. В соответствии с этим в дальнейшем под устойчивостью подразумевается условная асимптотическая устойчивость, т. е. устойчивость на многообразии $\|\Lambda\|=1$.

Решение задачи. Найдем алгоритмы управления, реализующие достижение произвольной установившейся ориентации КА $S(\Lambda_s)$ относительно ИСК при его произвольном начальном состоянии $\|\Lambda(t_0)\|=1$, $\omega(t_0) \in R^3$. Предварительно напомним, что одной и той же ориентации КА соответствуют кватернионы $\pm\Lambda_s$, так как $S(\Lambda_s)=S(-\Lambda_s)$.

Введем в фазовом пространстве системы уравнений (1), (2) при $\omega_* = 0$ множество

$$\Omega_1 = \{ \Lambda, \omega : \Lambda = \Lambda_s, \Lambda = -\Lambda_s, \|\Lambda_s\|=1, \omega = \omega_s = 0 \}, \quad (8)$$

соответствующее установившейся произвольно заданной ориентации КА $S(\Lambda_s) = S(-\Lambda_s)$ относительно ИСК, и выберем функцию Ляпунова (ФЛ) в виде

$$V_1(\Lambda, \omega) = \alpha [(\Lambda_s^T P_s \Lambda - 1)^2 + \Lambda^T (I - P_s) \Lambda] + 0.5 \omega^T J \omega, \quad (9)$$

где $\alpha > 0$ и $P_s = \Lambda_s (\Lambda_s^T \Lambda_s)^{-1} \Lambda_s^T = \Lambda_s \Lambda_s^T$ — оператор ортогонального проектирования векторов Λ на подпространство (прямую), порожденное вектором Λ_s [8, 14]. Эта функция положительно определена относительно множества Ω_1 : $V_1(\Lambda, \omega) = 0$ при $\Lambda, \omega \in \Omega_1$ и $V_1(\Lambda, \omega) > 0$ при $\Lambda, \omega \notin \Omega_1$. Нетрудно убедиться, что выражение в квадратных скобках в (9) представляет собой квадрат наименьшего расстояния от произвольной точки Λ до точек $\pm\Lambda_s$. Отметим также, что ФЛ (9) — негладкая функция по переменной Λ . Негладкие ФЛ использовались в работе [32] для исследования устойчивости решений дифференциальных уравнений. Там же приведено обобщение понятия производных для таких функций. В частности, для обобщенной производной от $|x(t)|$ приводится формула

$$\frac{d|x(t)|}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} \text{sign} x, \quad (10)$$

в которой условимся считать, что $\text{sign} x = 1$ при $x \geq 0$ и $\text{sign} x = -1$ при $x < 0$. Негладкая ФЛ, со-

держащая $|\lambda_0|$, использовалась для синтеза алгоритма управления ориентацией КА относительно ИСК в [26], являющегося частным случаем $\Lambda_s = (\pm 1, 0, 0, 0)$ рассматриваемой здесь общей постановки задачи $\Lambda_s^T \Lambda_s = 1$. Краткая библиография работ, в которых используются негладкие ФЛ, содержится в работе [31].

Производная согласно [32] от ФЛ (9), вычисленная по уравнениям (1), (2) с использованием формулы (10), имеет вид

$$\dot{V}_1(\Lambda, \omega) = \omega^T [-\alpha B^T(\Lambda) \Lambda_s \text{sign}(\Lambda_s^T \Lambda) + M_c + M_g - \ddot{\omega} J \omega]. \quad (11)$$

Выберем момент управления

$$M_c = \alpha B^T(\Lambda) \Lambda_s \text{sign}(\Lambda_s^T \Lambda) - M_g + \rho \ddot{\omega} J \omega - K \omega, \quad (12)$$

где ρ — коэффициент компенсации гироскопического момента $\ddot{\omega} J \omega$, $\rho \in [0, 1]$; K — симметричная положительно определенная матрица $K = K^T > 0$. При этом $\dot{V}_1(\Lambda, \omega) = -\omega^T K \omega$ — отрицательная знакопостоянная функция переменных Λ, ω , причем множество $N = \{\omega, \Lambda : \omega = 0, \Lambda \neq \pm\Lambda_s\}$, на котором $\dot{V}_1(\Lambda, \omega) = 0$, не содержит целых траекторий системы уравнений (1), (2), так как при этом $J\dot{\omega} = \alpha B^T(\Lambda) \Lambda_s \text{sign} \Lambda_s^T \Lambda \neq 0$. Поэтому из дополнения Барбашина — Красовского к теореме об асимптотической устойчивости [21] следует, что множество Ω_1 условно асимптотически устойчиво.

Заметим, что в алгоритме управления вместо постоянной матрицы K может использоваться симметричная матрица $K(\Lambda, \omega)$, удовлетворяющая условию $\omega^T [K(\Lambda, \omega) - K] \omega \geq 0 \forall \Lambda, \omega$.

Сопоставим свойства полученного алгоритма управления ориентацией (12) и свойства алгоритма из работы [6], основанного на непосредственном использовании прямого метода Ляпунова исследования устойчивости решений дифференциальных уравнений. Для полноты и наглядности сопоставления кратко воспроизведем соответствующий фрагмент из работы [6], где рассматривалась задача синтеза алгоритма управления ориентацией КА относительно ИСК при заданной ориентации $\Lambda_s = (1, 0, 0, 0)$ (в используемых тут обозначениях). В работе [6] выбиралась ФЛ вида

$$V_0(\Lambda, \omega) = \alpha (\Lambda - \Lambda_s)^T (\Lambda - \Lambda_s) + 0.5 \omega^T J \omega, \quad \Lambda_s = (1, 0, 0, 0). \quad (13)$$

В отличие от ФЛ $V_1(\Lambda, \omega)$, положительно определенной относительно множества Ω_1 из (8), ФЛ $V_0(\Lambda, \omega)$ положительно определена относительно решения $\Lambda(t) \equiv \Lambda_s$, $\omega(t) \equiv 0$ системы уравнений (1), (2), т. е. «одноточечного» множества $\Lambda = \Lambda_s$, $\omega = 0$ ее фазового пространства. Прделав выкладки, аналогичные для ФЛ $V_1(\Lambda, \omega)$, получим для рассматриваемого в работе [6] значения $\Lambda_s = (1, 0, 0, 0)$ управление

$$M_c = -\alpha\lambda - M_g + \rho\ddot{\omega}J\omega - K\omega. \quad (14)$$

Полученные результаты сформулируем в следующем утверждении.

Утверждение 1. При произвольных начальных условиях $\Lambda_0 = \Lambda(t_0)$, $\omega_0 = \omega(t_0)$, $\|\Lambda_0\| = 1$ и произвольных Λ_s , $\|\Lambda_s\| = 1$, управление M_c в виде (12) обеспечивает получение заданных свойств устойчивости решений уравнений (1), (2) $\|S(\Lambda(t)) - S(\Lambda_s)\| \rightarrow 0$, $\|\omega(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, т. е. достижение и стабилизацию произвольной заданной матрицей $S(\Lambda_s)$ ориентации КА относительно ИСК.

Для решения задачи синтеза управления ориентацией КА относительно ОСК по аналогии с [3, 9] проведем ее декомпозицию на кинематическую и динамическую задачи. При этом в кинематической задаче угловая скорость ω в уравнении (1) рассматривается как управление.

Введем в рассмотрение «двухточечное» множество

$$\Omega_2 = \{ \Lambda : \Lambda = \Lambda_s, \Lambda = -\Lambda_s, \|\Lambda_s\| = 1 \} \quad (15)$$

и выберем «кинематическую» ФЛ

$$V_c(\Lambda) = \Lambda^T (I - P_s) \Lambda. \quad (16)$$

Функция $V_c(\Lambda) = 0$ при $\Lambda = \pm\Lambda_s$, $V_c(\Lambda) > 0$ при $\Lambda \neq \pm\Lambda_s$, т. е. является положительно определенной относительно множества Ω_2 . Производная ФЛ (16) в силу уравнения (1)

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= (\omega - S(\Lambda)\omega_*)^T B^T(\Lambda)(\Lambda - P_s\Lambda) = \\ &= -(\omega - S(\Lambda)\omega_*)^T B^T(\Lambda)P_s\Lambda. \end{aligned} \quad (17)$$

Полагая в (17) «управление» ω_c в виде

$$\omega_c = S(\Lambda)\omega_* + B^T(\Lambda)P_s\Lambda, \quad (18)$$

получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_c(\Lambda) &= -\Lambda^T P_s B(\Lambda) B^T(\Lambda) P_s \Lambda = \\ &= -\Lambda^T P_s (I_4 - P_\Lambda) P_s \Lambda, \end{aligned} \quad (19)$$

где $P_\Lambda = \Lambda(\Lambda^T \Lambda)^{-1} \Lambda^T = \Lambda \Lambda^T$ — оператор проектирования на подпространство, образованное вектором Λ , а $(I_4 - P_\Lambda)$ — оператор проектирования на подпространство, ортогональное вектору Λ [8, 14]. Нетрудно убедиться, что производная ФЛ $\dot{V}_c(\Lambda) = 0$ при $\Lambda = \pm\Lambda_s$ и $\dot{V}_c(\Lambda) < 0 \forall \Lambda \neq \pm\Lambda_s$, т. е. является функцией, отрицательно определенной относительно множества Ω_2 . Поэтому ФЛ $V_c(\Lambda)$ монотонно убывает $\forall \Lambda \notin \Omega_2$, $\|\Lambda\| = 1$ и множество Ω_2 системы (1) при «управлении» (18) условно асимптотически устойчиво [19, 24].

Соотношением (18) в фазовом пространстве Λ, ω системы (1), (2) определяется многомерная поверхность $\omega = \omega_c(\Lambda)$ [18], двигаясь по которой изображающая точка в асимптотике придет к требуемому положению $\omega_s = S(\Lambda_s)\omega_*$, $\Lambda = \Lambda_s$ или $\Lambda = -\Lambda_s$, т. е. к требуемой ориентации, однозначно определяемой матрицей $S(\Lambda_s)$.

Найдем теперь управляющий момент M_c , при котором может реализоваться «управление» (18), для чего выберем «динамическую» ФЛ

$$V_d(\omega, \Lambda) = 0.5(\omega - \omega_c)^T J(\omega - \omega_c), \quad (20)$$

где ω_c определяется формулой (18). Дифференцируя ФЛ, в силу системы (1), (2) находим

$$\dot{V}_d(\omega, \Lambda) = (\omega - \omega_c)^T (M_c + M_g - \ddot{\omega}J\omega - J\dot{\omega}_c). \quad (21)$$

Полагая в (21) управляющий момент

$$M_c = -M_g + \ddot{\omega}J\omega + J\dot{\omega}_c - \tau^{-1}J(\omega - \omega_c), \quad (22)$$

получим

$$\dot{V}_d = -\tau^{-1}(\omega - \omega_c)^T J(\omega - \omega_c) = -\tau^{-1}V_d, \quad (23)$$

$$\tau \dot{V}_d + V_d = 0. \quad (24)$$

Из (24) с учетом (23) непосредственно следует, что $\|\omega - \omega_c\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, а следовательно, уменьшается и ФЛ (16). Этот же результат можно получить и иначе. Подставив значение M_c из (22) в уравнение (2), получим $\tau\dot{\sigma} + \sigma = 0$, $\sigma = \omega - \omega_c$, из которого также следует, что $\|\omega - \omega_c\| \rightarrow 0$. Заметим, что пренебрегая в алгоритме (22) слагаемым $J\dot{\omega}_c$, отсюда непосредственно получаем $\tau\dot{\omega} + \omega = \omega_c$. Это уравнение с точностью до при-

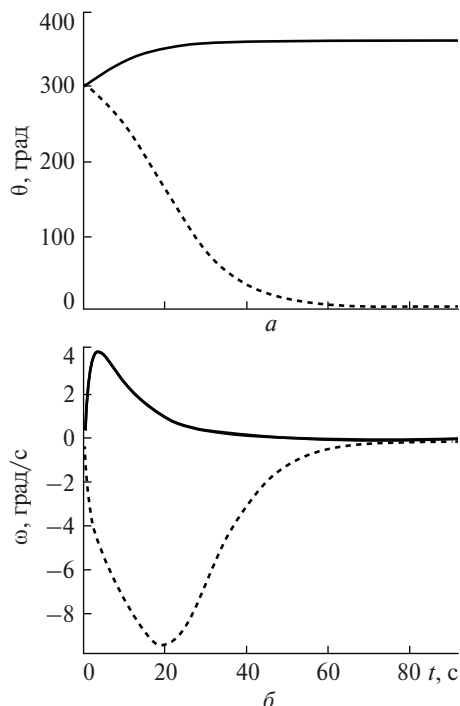


Рис. 1. Переходный процесс установления ориентации: а — по углу ϑ , б — по угловой скорости $\omega_3(t) \rightarrow 0$

нятых тут предположений и обозначений совпадает с уравнением (5) из работы [30], в которой исследуются алгоритмы управления ориентацией орбитального комплекса «Мир».

Для завершения решения задачи нужно найти значение производной $\dot{\omega}_C$, входящей в (22). Формула (18) может быть представлена в виде

$$\dot{\omega}_C = S(\Lambda)\omega_* + B^T(\Lambda)\Lambda_S\Lambda_S^T\Lambda. \quad (25)$$

Из (25) последовательно получаем

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_C = & [-\tilde{\omega}S(\Lambda) + S(\Lambda)\tilde{\omega}_*]\omega_* - \\ & - B^T(\Lambda_S)[\dot{\Lambda}\Lambda_S^T\Lambda + \Lambda\Lambda_S^T\dot{\Lambda}], \end{aligned} \quad (26)$$

где $\dot{\omega}_C = f(\omega, \Lambda)$,

$$\begin{aligned} f(\omega, \Lambda) = & -\tilde{\omega}S(\Lambda)\omega_* - 0.5B^T(\Lambda_S) \cdot [B(\Lambda)\tilde{\omega}\Lambda_S^T\Lambda + \\ & + \Lambda\Lambda_S^TB(\Lambda)\tilde{\omega}], \quad \tilde{\omega} = \omega - S(\Lambda)\omega_*. \end{aligned}$$

При получении формулы (26) использовалось легко непосредственно проверяемое равенство $B^T(\Lambda)\Lambda_S = -B^T(\Lambda_S)\Lambda$ и известное обобщенное уравнение Пуассона для производной матрицы направляющих косинусов $\dot{S}(\Lambda) = -\tilde{\omega}S(\Lambda) + S(\Lambda)\tilde{\omega}_*$ [23].

В итоге получаем следующий результат.

Утверждение 2. При произвольных начальных условиях Λ_0 , ω_0 , $\|\Lambda_0\|=1$ и Λ_S , $\|\Lambda_S\|=1$ уп-

равление M_C в виде (22) с учетом (18), (26) обеспечивает достижение и стабилизацию заданной ориентации КА относительно ОСК, однозначно определяемой матрицей $S(\Lambda_S)$.

Очевидно, что при $\omega_* = 0$ в уравнениях (1), (2) управление (22) обеспечивает достижение и стабилизацию заданной ориентации КА относительно ИСК.

Техническая реализация предложенных алгоритмов формирования управляющих моментов M_C может быть осуществлена с помощью произвольных гиросиловых систем с непосредственным использованием способов, предложенных, например, в [10].

Компьютерное моделирование. Эффективность полученных алгоритмов управления иллюстрируется результатами компьютерного моделирования процессов ориентации. Матрица инерции полагалась равной $J = \text{diag}\{40, 20, 40\}$. Интегрирование уравнений (1), (2) выполнялось методом Рунге—Кутты с шагом $\Delta t = 0.05$ с.

Был выполнен эксперимент по сопоставлению предложенного алгоритма (12) с алгоритмом (14) из работы [6] при параметрах алгоритмов $\alpha = 5$, $K = \text{diag}\{30, 30, 30, 30\}$, $\rho = 1$ и начальных условиях при $t_0 = 0$, $\omega^T(t_0) = (0, 0, 0)$, $\Lambda^T(t_0) = (-\sqrt{3}/2, 0, 0, 1/2)$. Начальное условие $\Lambda^T(t_0)$ соответствует совпадению осей Oz и Oz_0 ССК и ИСК и отклонению оси Ox от Ox_0 на угол $\vartheta(t_0) = 300^\circ$, $(\lambda_0(t_0) = \cos(\vartheta(t_0)/2) = -\sqrt{3}/2$, $\lambda_3(t_0) = \sin(\vartheta(t_0)/2) = 1/2)$. Рассматривался случай совмещения осей ССК с осями ИСК. При этом установившаяся ориентация КА для алгоритма (14) определялась вектором Λ_S^T , а для алгоритма (12) матрицей $S(\Lambda_S) = I_3$.

На рис. 1 показаны переходные процессы установления ориентации по углам $\vartheta(t)$ и угловым скоростям $\omega(t)$. При этом текущие значения $\vartheta(t)$ определялись по полученным значениям $\lambda_0(t) = \cos(\vartheta(t)/2)$, $\lambda_3(t) = \sin(\vartheta(t)/2)$ с использованием обратных тригонометрических функций.

Алгоритму (12) соответствуют сплошные линии, алгоритму (14) — пунктирные. Видно, что предложенный алгоритм (12) реализует установление заданной ориентации, т. е. совмещение ССК с ИСК по кратчайшему пути — поворот от 300° на

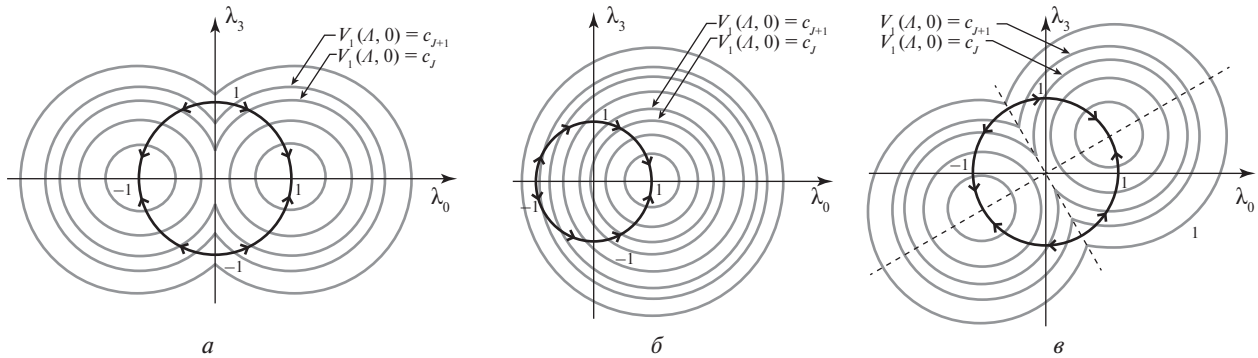


Рис. 2. Сечения плоскостью $\omega_3 = 0$ поверхностей: *а* — уровни ФЛ $V_1(\Lambda, \omega)$ и многообразия M при $\Lambda_S = (\pm 1, 0, 0, 0)$, *б* — уровни ФЛ $V_1(\Lambda, \omega)$ и многообразия M при $\Lambda_S = (\pm 1, 0, 0, 0)$, *в* — уровни ФЛ и многообразия M при $\Lambda_S = (\pm 0.5\sqrt{3}, 0, 0, \pm 0.5)$

60° до $\vartheta = 360^\circ$, $\Lambda^T = (-1, 0, 0, 0)$. Алгоритм (14) выполняет поворот на 300° до $\vartheta = 0^\circ$, $\Lambda^T = (1, 0, 0, 0)$. Напомним, что одной и той же ориентации соответствуют кватернионы Λ и $-\Lambda$.

Свойства алгоритмов (12) и (14) наглядно иллюстрируются топологиями фазовых траекторий систем (1), (2), приведенными на рис. 2, *а, б*.

Здесь показаны сечения поверхностей уровней ФЛ $V_1(\Lambda, \omega)$ (9), $V_0(\Lambda, \omega)$ (13) и интегрального многообразия M системы (1), (2) — цилиндрической поверхности $M = \{\lambda_0, \lambda_3, \omega_3 : \lambda_0^2 + \lambda_3^2 = 1, -\infty < \omega_3 < \infty\}$ плоскостью $\omega_3 = 0$. Стрелками показаны направления движения, соответствующие убыванию ФЛ. На рис. 2, *а* стрелки в зависимости от начальной ориентации $\|\Lambda(t_0)\| = 1$ указывают направления кратчайшего движения к требуемой установившейся ориентации $S(\Lambda_S) = I_3$, при которой $\Lambda_S = (1, 0, 0, 0)$ или $\Lambda_S = (-1, 0, 0, 0)$. Стрелки на рис. 2, *б* иллюстрируют, что при алгоритме (14) независимо от начальной ориентации $\|\Lambda(t_0)\| = 1$, даже соответствующей достаточно близкому требуемому совмещению осей Ox и Ox_0 , движение всегда направлено к $\Lambda_S = (1, 0, 0, 0)$.

На рис. 2, *в* приведена структура фазовых траекторий системы (1), (2) при алгоритме (12), соответствующая заданной ориентации $S(\Lambda_S)$ при $\Lambda_S = (\pm 0.5\sqrt{3}, 0, 0, \pm 0.5)$.

Был выполнен дополнительный вычислительный эксперимент для иллюстрации работоспособности алгоритма (12). Требуемая ориентация Λ_S задавалась следующими значениями углов Крылова — Эйлера $\vartheta_S = 90^\circ$, $\gamma_S = 60^\circ$,

$\psi_S = 120^\circ$, где ϑ, γ, ψ — углы тангажа, крена и рыскания. Пересчет в соответствующие значения компонентов кватерниона $\Lambda_S^T = (\lambda_{0S}, \lambda_S^T)$, $\lambda_S^T = (\lambda_{1S}, \lambda_{2S}, \lambda_{3S})$ выполнялся по формулам

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_1 &= \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_3 &= \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \end{aligned}$$

полученным по аналогии с [3] для последовательности поворотов при переходе от ОСК к ССК $3 \rightarrow 1 \rightarrow 2$ ($\vartheta \rightarrow \gamma \rightarrow \psi$). При этом $\Lambda_S^T = \frac{1}{4}(0, -\sqrt{2}, 2\sqrt{2}, \sqrt{6})$, $\|\Lambda_S\| = 1$. Начальные значения для системы (1), (2) при $t_0 = 0$ полагались равными $\omega(t_0) = 0$, $\Lambda^T(t_0) = (1, 0, 0, 0)$.

На рис. 3, *а* показаны переходные процессы установления ориентации по компонентам кватерниона λ_j , $j = 0, 1, 2, 3$, при параметрах $\alpha = 3$, $K = \text{diag}\{30, 30, 30, 30\}$, $\rho = 1$ алгоритма (12). Соответствующие переходные процессы по угловым скоростям $\omega_j(t) \rightarrow 0$, $j = 1, 2, 3$ показаны на рис. 3, *б*. Приведенный на рис. 3 вид переходных процессов установления требуемой ориентации иллюстрирует эффективность алгоритма (12) при выполнении произвольных пространственных эволюций.

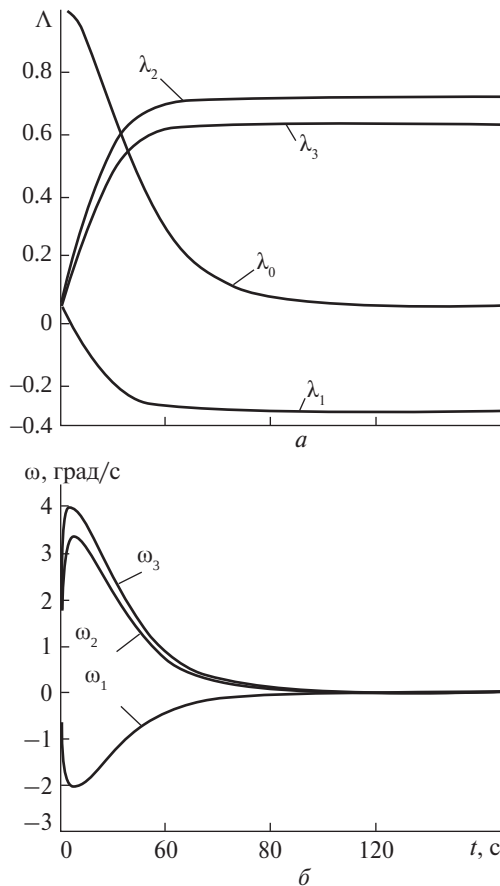


Рис. 3. Переходные процессы, полученные с использованием алгоритма (12): a — по компонентам кватерниона, b — по угловым скоростям

Выполнен вычислительный эксперимент по проверке эффективности алгоритма (22), (26) управления ориентацией относительно ОСК при $\tau = 40$ с и радиусе орбиты $R = 7070$ км. Рассматривался вариант $S(\Lambda_s) = I_3$, т. е. совмещение в установившемся режиме ССК с ОСК. Начальные условия полагались следующими: $\omega^T(t_0) = (0, 0, 0)$, $\vartheta(t_0) = 90^\circ$, $\gamma(t_0) = -90^\circ$, $\psi(t_0) = 120^\circ$, где ϑ, γ, ψ — углы тангажа, крена и рыскания. Пересчет начальных условий, заданных в углах Эйлера — Крылова, в начальные условия в компонентах кватерниона выполнялся по формулам (27).

Переходные процессы установления ориентации $\lambda_j(t)$, $j = 0, 1, 2, 3$ и $\omega_i(t)$, $i = 1, 2, 3$ показаны на рис. 4. Рисунки иллюстрируют процесс устойчивого совмещения ССК с ОСК $\lambda_0(t) \rightarrow 1$, $\lambda_j(t) \rightarrow 0$, $j = 1, 2, 3$, $\omega_1(t) \rightarrow 0$, $\omega_2(t) \rightarrow 0$, $\omega_3(t) \rightarrow \omega_{*3} = -\sqrt{\mu/R^3} \approx -0.061^\circ/\text{с}$.

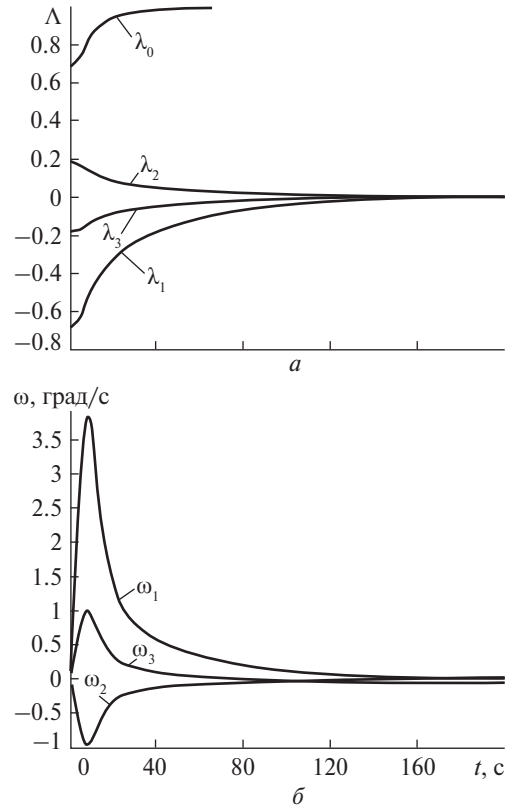


Рис. 4. Переходные процессы, полученные с использованием алгоритма (22): a — по компонентам кватерниона, b — по угловым скоростям

Выполненные вычислительные эксперименты иллюстрируют эффективность использования предложенных алгоритмов управления для получения и стабилизации требуемой ориентации КА относительно инерциальной и орбитальной систем координат.

При компьютерном моделировании динамики системы управления с использованием предложенных алгоритмов процессы ориентации характеризуются текущими значениями компонентов кватернионов. При необходимости получения соответствующих углов Эйлера — Крылова можно воспользоваться, например, алгоритмами [15, 16, 33].

ВЫВОДЫ

С использованием единого методологического подхода, основанного на известных обобщениях прямого метода Ляпунова, на исследование ус-

тойчивости инвариантных множеств динамических систем получены следующие результаты.

Получено обобщение алгоритмов управления ориентацией КА, обеспечивающих совмещение связанной системы координат с инерциальной системой координат, на достижение и стабилизацию произвольно заданной ориентации КА.

Получены новые алгоритмы управления, обеспечивающие достижение и стабилизацию произвольно заданной ориентации КА относительно орбитальной системы координат.

Проведенное компьютерное моделирование проиллюстрировало эффективность полученных алгоритмов управления ориентацией.

ЛИТЕРАТУРА

- Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребенников Е. А. и др. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. — М.: Наука, 1971. — 584 с.
- Белецкий В. В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. — М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 1975. — 308 с.
- Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1973. — 320 с.
- Бутенин Н. В., Лунц Ю. Я., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. — М.: Наука, 1979. — Т. 2. — 544 с.
- Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. — М.: Наука, 1969. — Ч. II. — 332 с.
- Ви Б., Уэйс Х., Эрпостасис Э. Управление поворотом космического аппарата вокруг собственной оси с обратной связью по компонентам кватерниона // Аэрокосмическая техника. — 1990. — № 3. — С. 3—11.
- Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. — М.: Мир, 1990. — 292 с.
- Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984. — 320 с.
- Волосов В. В. Об управлении ориентацией космического аппарата в орбитальной системе координат с использованием эллипсоидальных оценок его вектора состояния // Проблемы управления и информатики. — 1998. — № 5. — С. 31—41.
- Волосов В. В., Куценко И. А., Попадинец В. И. Математические модели вращательного движения космических аппаратов с избыточными системами гиринов и маховиков и задачи управления их ориентацией // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 1. — Ч. I. — С. 101—116; № 3. — Ч. II. — С. 109—116.
- Волосов В. В., Куценко И. А., Селиванов Ю. А. Разработка и исследование робастных алгоритмов эллипсоидального оценивания инерционных характеристик космического аппарата, управляемого силовыми гироскопами // Проблемы управления и информатики. — 2005. — № 4. — С. 124—139.
- Волосов В. В., Тютюнник Л. И. Синтез законов управления ориентацией космического аппарата с использованием кватернионов // Космічна наука та технологія. — 1999. — 5, № 4. — С. 61—69.
- Волосов В. В., Хлебников М. В., Шевченко В. Н. Алгоритм прецизионного управления ориентацией космического аппарата при действии неконтролируемого возмущения // Проблемы управления и информатики. — 2011. — № 2. — С. 114—121.
- Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1967. — 575 с.
- Голубев Ю. Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела. — М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2013. — 23 с. (Препринт № 39).
- Гордеев В. Н. Кватернионы и трехмерная геометрия. — Киев, 2012. — 60 с.
- Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. — М.: Наука, 1967. — 472 с.
- Ефимов Н. В., Розендорн Е. А. Линейная алгебра и многомерная геометрия. — М.: Наука, 1970. — 528 с.
- Зубов В. И. Устойчивость движения. — М.: Высш. шк., 1973. — 272 с.
- Кириченко Н. Ф., Матвиенко В. Т. Алгоритмы асимптотической, терминальной и адаптивной стабилизации вращательных движений твердого тела // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 1. — С. 5—15.
- Красовский Н. Н. Обобщение теорем второго метода Ляпунова // Теория устойчивости движения / И. Г. Малкин. — М.: Наука, 1966. — С. 463—467.
- Крыжевнич С. Г. Обобщение теоремы Ляпунова об условной устойчивости на случай неаналитичности // Дифференциальные уравнения и процессы управления. — 1998. — № 3. — С. 43—55. — URL: <http://www.neva.ru/journal>
- Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
- Ла-Салль Ж., Левиец С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова. — М.: Мир, 1964. — 168 с.
- Лебедев Д. В., Ткаченко А. И., Штепа Ю. П. Магнитная система управления угловым движением микроспутника // Космічна наука і технологія. — 1996. — 2, № 5-6. — С. 17—25.
- Лебедев Д. В. Керування орієнтацією твердого тіла з використанням параметрів Родрига — Гамільтона // Автоматика. — 1974. — № 4. — С. 29—32.
- Онищенко С. М. Оптимальная стабилизация искусственного спутника Земли избыточной системой маховиков // Проблемы управления и информатики. — 2016. — № 6. — С. 133—143.
- Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. — М.: Наука, 1974. — 600 с.

29. Рябова А. В., Тертычный-Даури В. Ю. Элементы теории устойчивости. — С.-Пб.: Изд-во ИТМО, 2015. — 208 с.
 30. Сарычев В. А., Беляев М. Ю., Зайков С. Г., Сазонов В. В., Тесленко Б. П. Математическое моделирование эйлеровых разворотов орбитального комплекса «Мир» гиродинами // Космич. исслед. — 1991. — 29, вып. 4. — С. 532—543.
 31. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Негладкий анализ и синтез систем регулирования на основе прямого метода Ляпунова // Приборостроение. — 1994. — 37, № 7—8. — С. 5—15.
 32. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. — М.: Наука, 1985. — 224 с.
 33. Филиппов Ю. И. Эффективный алгоритм преобразования кватерниона в систему углов Эйлера-Крылова // Полет. — 2009. — № 6. — С. 32—35.
 34. Челноков Ю. Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением. — М.: Физматлит, 2011. — 560 с.
- Стаття надійшла до редакції 24.01.18
- ## REFERENCES
1. Abalakin V. K., Aksenov Ye. P., Grebennikov Ye. A., et al. Reference Guide on celestial mechanics and astrodynamics. Ed. 2. — M.: Nauka, 1971. — 584 p. [in Russian].
 2. Beletsky V. V. Satellite motion relative to the center of mass in a gravitational field. — M.: Lomonosov MGU Press, 1975. — 308 p. [in Russian].
 3. Branets V. N., Shmyglevsky I. P. The use of quaternions in problems of solid-state orientation, 320 p. (Nauka, Moscow, 1973) [in Russian].
 4. Butenin N. V., Lunts Yu. Ya., Merkin D. R. Course of theoretical mechanics. — M.: Nauka, 1979. Vol. 2. — 544 p. [in Russian].
 5. Bucholtz N. N. Basic course of theoretical mechanics. — M.: Nauka, 1969. P. II. — 332 p. [in Russian].
 6. Vi B., Ueys Kh., Erepostasis E. Control of the rotation of the spacecraft around its own axis with feedback on the components of the quaternion. *Aerokosmicheskaya tekhnika*. — 1990. — N 3. — P. 3—11 [in Russian].
 7. Wittenburg Y. Dynamics of systems of rigid bodies. — M.: Mir, 1990. — 292 p. [in Russian].
 8. Voyevodin V. V., Kuznetsov Yu. A. Matrices and calculations. — M.: Nauka, 1984. — 320 p. [in Russian].
 9. Volosov V. V. Attitude control of a spacecraft in the orbital coordinate system using ellipsoidal estimates of its state vector. *J. Automation and Information Sciences*, 1999, Vol. 31, N 4-5. — P. 24—32.
 10. Volosov V. V., Kutsenko I. A., Popadinets V. I. Mathematical models of rotational motion of spacecrafts with superfluous systems of gyroscopes and flywheels and problems of control of their attitude. Ph. I, II. *J. Automation and Information Sciences*, 2003, Vol. 35, N 2. — P. 101—116, Vol. 35, N 6. — P. 109—116.
 11. Volosov V. V., Kutsenko I. A., Selivanov Yu. A. Development and investigation of the robust algorithms of ellipsoidal estimation of the inertia characteristics of a spacecraft controlled by powered gyroscopes. *J. Automation and Information Sciences*, 2005, Vol. 37, N 4. — P. 44—57.
 12. Volosov V. V., Tyutyunnik L. I. Synthesis of spacecraft attitude control algorithms using quaternions. *Space Science and Technology*, 1999, Vol. 5, N 4. — P. 61—69 [in Russian].
 13. Volosov V. V., Khlebnikov M. V., Shevchenko V. N. Algorithm of precision control of spacecraft orientation under action of uncontrollable disturbance. *J. Automation and Information Sciences*, 2011, Vol. 43, N 3. — P. 59—66.
 14. Gantmacher F. R. Matrix theory. — M.: Nauka, 1967. — 575 p. [in Russian].
 15. Golubev Yu. F. Quaternion algebra in rigid body kinematics. — M. V. Keldysh. Institute of Applied Mathematics Press, 2013, N 39. — 23 p. [in Russian].
 16. Gordeyev V. N. Quaternions and three-dimensional geometry. — Kiev, 2012. — 60 p. [in Russian].
 17. Demidovich B. P. Lectures on the mathematical stability theory. — M.: Nauka, 1967. — 472 p. [in Russian].
 18. Efimov N. V., Rozendorn Ye. A. Linear algebra and multidimensional geometry. — M.: Nauka, 1970. — 528 p. [in Russian].
 19. Zubov V. I. Motion stability. — Vysshaya shkola, 1973. — 272 p. [in Russian].
 20. Kirichenko N. F., Matviyenko V. T. Algorithms of asymptotic, terminal and adaptive stabilization of rotary motions of a rigid body. *J. Automation and Information Sciences*, 2003, Vol. 35, N 1. — P. 1—9.
 21. Krasovsky N. N. Generalization of the theorems of the Lyapunov second method. In Malkin I. G. Theory of motion stability. — M.: Nauka, 1966. — P. 463—467 [in Russian].
 22. Kryzhevich S. G. The generalization of the Lyapunov theorem on conditional stability for non-analytic case. *Differential equations and control processes*, 1998, N 3. — P. 43—55. — <http://www.neva.ru/journal> [in Russian].
 23. Kuzovkov N. T., Salychev O. S. Inertial navigation and optimal filtrations. — M.: Mashinostroyeniye, 1982. — 216 p. [in Russian].
 24. La Salle J., Lefschetz S., Stability by Liapunov's direct method. — M.: Mir, 1964. — 168 p. [in Russian].
 25. Lebedev D. V., Tkachenko A. I., Shtepa Yu. P. Magnetic system for controlling the angular motion of a micro-satellite. *Space science and technology*, 1996, Vol. 2, N 5-6. — P. 17—25 [in Russian].
 26. Lebedev D. V. Attitude control of a rigid body utilizing Rodrigues-Hamilton parameters. *Avtomatika*, 1974, N 4. — P. 29—32 [in Russian].
 27. Onishchenko S. M. Optimal stabilization of the Earth artificial satellite with redundant system of fly-wheels. *J. Automation and Information Sciences*, 2016, Vol. 48, N 12. — P. 1—12.

28. Raushenbakh B. V., Tokar Ye. N. Spacecraft attitude control. — M.: Nauka, 1974. — 600 p. [in Russian].
29. Ryabova A. V., Tertychny-Dauri V. Yu. Elements of stability theory. — ITMO S.-Pb, 2015. — 208 p. [in Russian].
30. Sarychev V. A., Belyaev M. Yu., Zaykov S. G., Sazonov V. V., Teslenko B. P. Mathematical modeling of Eulerian turns of the Mir orbital complex by using gyroclines. *Cosmic Research*, 1991, Vol. 29, N 4. — P. 458–468.
31. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Non-smooth analyses and synthesis of regulation systems based on the direct Lyapunov method. *Pribozrostroyeniye*, 1994, Vol. 37, N 7–8. — P. 5–15 [in Russian].
32. Filippov A. F. Differential equations with discontinuous right-hand side. — M.: Nauka, 1985. — 224 p. [in Russian].
33. Filippov Yu. I. Effective algorithm of transformation of a quaternion to the system of Euler-Krylov angles. *Polet*, 2009, N 6. — P. 32–35 [in Russian].
34. Chelnokov Yu. N. Quaternion models and methods in dynamics, navigation, and motion control. — M.: Fizmatlit, 2011. — 560 p. [in Russian].

Received 24.01.18

B. B. Волосов, В. М. Шевченко

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

СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ КУТОВИМ РУХОМ КОСМІЧНОГО АПАРАТА НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕННЯ ПРЯМОГО МЕТОДУ ЛЯПУНОВА

Роботу присвячено розв'язанню задач синтезу керування орієнтацією орбітального космічного апарата (КА) на основі відомих узагальнень Зубова — Красовського прямого методу Ляпунова окремих розв'язків диференціальних рівнянь на дослідження стійкості множин в їхньому фазовому просторі. Кінематичні рівняння кутового руху КА представлено диференціальними рівняннями у векторно-матричній формі з вектором стану в реальному евклідовому просторі. Елементами цього простору є вектори параметрів Родріга — Гамільтона. Дані рівняння мають такі відомі особливості. Одна з них полягає в тому, що одній і тій самій заданій орієнтації КА відповідають два вектора стану, компоненти яких відрізняються один від одного тільки знаками. Другою особливістю є наявність для диференціальних рівнянь геометричного інтеграла руху — збереження норми вектора параметрів орієнтації. Відзначено, що внаслідок цього розв'язки рівнянь не можуть бути асимптотично стійкими по Ляпунову. Вони можуть мати тільки властивість умовної стійкості. З урахуванням цих особливостей вперше сформульовано відповідну постановку задачі синтезу керування орієнтацією КА як задачі про умовну асимптотичну стійкість рішень диференціальних рівнянь або стійкості на множинах. Конкретніше — як задачі про

стійкість двоточкових множин у фазовому просторі. Для розв'язування задач запропоновано нову негладку кусково-квадратичну функцію Ляпунова. Отримано розв'язки задач синтезу керувань, що забезпечують досягнення і стабілізацію заданих орієнтацій КА в інерціальній та орбітальних системах координат. Ефективність запропонованих алгоритмів проілюстровано комп'ютерним моделюванням.

Ключові слова: космічний апарат, орієнтація, синтез керування, функція Ляпунова.

V. V. Volosov, V. M. Shevchenko

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

SYNTHESIS OF CONTROL OF THE ANGULAR MOTION OF A SPACECRAFT ON THE BASIS OF GENERALIZATION OF THE DIRECT LYAPUNOV METHOD

The work deals with solving the problems of attitude control synthesis for an orbital spacecraft based on the known Zubov-Krasovskii generalizations of the direct Lyapunov method for studying the stability of individual solutions of differential equations to analyze the stability of closed bounded sets in their phase space. The kinematic equations of the angular motion of a spacecraft are represented by differential equations in the vector-matrix form with a state vector in the real Euclidean space. The elements of this space are the vectors of Rodrigues-Hamilton parameters. The given equations are characterized by the following generally known peculiarities. One of them lies in the fact that the same specified physical orientation of a spacecraft corresponds to two state vectors whose components differ only in sign. The second peculiarity of the differential equations is the presence of the geometrical motion integral — conservation of the norm of the vector of orientation parameters. It is noted that, as a consequence, solutions of the equations cannot be asymptotically stable by Lyapunov. They can be characterized only by conditional stability. With regard for these peculiarities, the corresponding problem of control synthesis for spacecraft orientation is for the first time formulated as a problem of the conditional asymptotic stability of the solutions of the differential equations or stability on manifolds. More precisely, it is a problem of stability of two-point sets in the phase space. A new non-smooth piecewise-quadratic Lyapunov function is proposed to solve the problem. The obtained solutions of the problems of control synthesis provide the achievement and stabilization of the given orientations of a spacecraft in the inertial and orbital coordinate systems. The effectiveness of the proposed algorithms is illustrated by computer simulation.

Keywords: spacecraft, orientation, control synthesis, Lyapunov function.

О. В. Сафронов, Б. Й. Семон, О. М. Неділько

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ АЕРОДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ КЕРУВАННЯ НА РІВЕНЬ ЇХНІХ КОЛИВАНЬ ПРИ ВИНИКНЕННІ ТРАНСЗВУКОВОГО ФЛАТЕРА

Випадки виникнення інтенсивних коливань елементів конструкцій надзвукових авіаційних та авіаційно-космічних літальних апаратів на близькозвукових числах M польоту мають місце в сучасній практиці їхньої експлуатації. Деякі з цих випадків закінчувалися важкими льотними подіями, тому проблема зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування надзвукових та гіперзвукових літаків при виникненні трансзвукового флатера залишається актуальною. Метою статті є оцінка можливості зменшення рівня коливань за рахунок аеродинамічної компенсації поверхні керування та розробка математичної моделі оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхонь керування на рівень їхніх коливань при виникненні трансзвукового флатера. З метою вирішення цієї проблеми проведено аналіз публікацій, присвячених даній тематиці, і в яких викладено матеріали лабораторних і натурних досліджень цього явища. Оскільки коливання аеродинамічних поверхонь керування при виникненні трансзвукового флатера відносять до автоколивань з амплітудою граничного циклу, тобто до нелінійних коливань, то математичну модель оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхні керування на рівень їхніх коливань представлено у вигляді звичайного диференціального рівняння другого порядку з нелінійною правою частиною. Для вирішення диференціального рівняння даного типу був використаний метод енергетичного балансу за допомогою якого визначалася амплітуда коливань аеродинамічних поверхонь керування. За результатами розрахунків на основі запропонованої моделі отримана залежність рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування від величини їхньої аеродинамічної компенсації, яка може бути запропонована для попередньої наближеної оцінки аеропружних характеристик надзвукових та гіперзвукових літаків.

Ключові слова: математична модель, аеродинамічна поверхня керування, шарнірний момент, аеродинамічна компенсація, трансзвуковий флатер, надзвуковий літак.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблема зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування надзвукових та гіперзвукових літаків при виникненні трансзвукового (одноступеневого) флатера досі залишається актуальною. Актуальність цієї проблеми обумовлена відсутністю загальноприйнятої математичної моделі виникнення цього явища і, як наслідок,

відсутністю науково обґрунтованих методів зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь літаків на трансзвукових швидкостях польоту та критеріїв моделювання цього явища в аеродинамічних трубах. Особливо гостро необхідність вирішення цієї проблеми постала для на надзвукових літаків третього покоління колишнього СРСР, рівень коливань аеродинамічних поверхонь керування на яких значно перевищував допустимі.

Випадки виникнення інтенсивних коливань елементів конструкцій вертикального оперення

спостерігалися практично на усіх надзвукових літаках, деякі з цих випадків закінчувалися важкими льотними подіями [11]. Більшість випадків виникнення трансзвукового флатера спостерігалось на аеродинамічних поверхнях, розташованих у потоці повітря під нульовим кутом атаки. Але на деяких літаках з широким фюзеляжем спостерігалися і фюзеляжні форми трансзвукового флатера. Проблеми, пов'язані з подоланням трансзвукового діапазону чисел M польоту орбітальним кораблем «Буран», також були віднесені розробниками цієї програми до найбільш складних проблем аеропружності. Не застраховані від цього явища і перспективні надзвукові та гіперзвукові літаки, про що свідчить катастрофа гіперзвукового суборбітального літака Space Ship Two 31 жовтня 2014 р. у трансзвуковому діапазоні чисел M польоту. Аналіз опублікованих матеріалів цієї катастрофи та аналіз характеру руйнації аеродинамічних поверхонь літака дозволяють зробити припущення про те, що однією з можливих причин цієї події було виникнення трансзвукового флатера аеродинамічних поверхонь керування [11].

За даними експериментальних досліджень [11] трансзвуковий флатер аеродинамічних поверхонь керування виникає у вузькому діапазоні навколо звукових чисел M польоту і супроводжується значним збільшенням рівня коливань аеродинамічних поверхонь та їхньою руйнацією за 0.5...1.0 с. У роботі [10] було показано, що трансзвуковий флатер аеродинамічних поверхонь керування надзвукових літаків без додаткових засобів зменшення рівня їхніх коливань може виникати на всіх висотах польоту. Тому безпеку польотів літаків на трансзвукових швидкостях можна забезпечити або шляхом зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь різноманітними засобами, або шляхом обмеження допустимих режимів польоту літаків.

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблемі зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування надзвукових літаків на трансзвукових швидкостях польоту присвячені публікації [1, 3, 6].

У роботі [1] розглядається можливість зменшення рівня коливань аеродинамічних поверх-

онь керування шляхом збільшення в'язкого демпфування. Було зауважено, що визначення необхідної величини в'язкого демпфування пов'язане з труднощами, оскільки немає точних методів оцінки шарнірних моментів від сил в'язкого демпфування. Розглядалась також можливість зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування шляхом збільшення власної частоти їхніх коливань.

У роботі [3] приведено значення числа Струхалю, тобто, значення безрозмірної частоти власних пружних коливань аеродинамічних поверхонь керування, при якому коливання не повинні виникати. Але і при цих значеннях числа Струхалю на деяких надзвукових літаках на трансзвукових швидкостях польоту спостерігалось виникнення коливань аеродинамічних поверхонь керування.

У роботі [6] приведено результати продувок аеродинамічно подібних моделей в аеродинамічних трубах та оцінено вплив аеродинамічної компенсації поверхонь керування на можливість виникнення трансзвукового флатера, але теоретичного узагальнення результатів продувок не зроблено.

Мета статті — розробити математичну модель оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхонь керування на рівень їхніх коливань при виникненні трансзвукового флатера.

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТРАНСЗВУКОВОГО ФЛАТЕРА

У даному випадку математична модель виникнення трансзвукового флатера аеродинамічної поверхні керування може бути подана у вигляді диференціального рівняння другого порядку з нелінійною правою частиною, як це було запропоновано у роботі [9]

$$\ddot{\delta}(t) + \frac{\nu}{\pi} \omega \dot{\delta}(t) + \omega^2 \delta(t) = \frac{1}{\bar{J}_k} [\bar{M}_a(\dot{\delta}) + \bar{M}_c(\dot{\delta})], \quad (1)$$

де $\delta(t)$ — відхилення аеродинамічної поверхні керування від звичайного положення, ν — логарифмічний декремент коливань аеродинамічної поверхні керування, ω — кутова частота власних пружних коливань аеродинамічної поверхні керування у наземних умовах, $\bar{J}_k$ — розподіле-

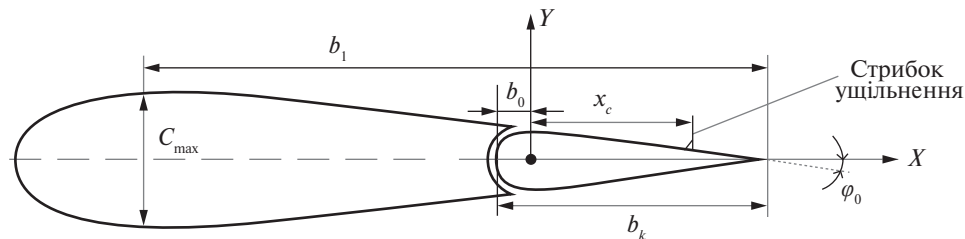


Рис. 1. Геометричні характеристики профіля поверхні керування

ний масовий момент інерції аеродинамічної поверхні керування, $\bar{M}_a(\dot{\delta})$ — розподілений шарнірний момент аеродинамічної поверхні керування, обумовлений силами аеродинамічного демпфірування, $\bar{M}_c(\dot{\delta})$ — розподілений збуджений шарнірний момент, обумовлений взаємодією стрибків ущільнення з коливаннями поверхонь керування, тобто шарнірний момент, внаслідок якого виникає трансзвуковий флатер.

До шарнірних моментів аеродинамічної поверхні керування необхідно віднести і момент, який обумовлений силами конструкційного (в'язкого) демпфування, розподілена величина якого, як випливає з рівняння (1), дорівнює

$$\bar{M}_k(\dot{\delta}) = -\frac{1}{\pi} \bar{J}_k \omega \dot{\delta}(t). \quad (2)$$

Оскільки збуджений шарнірний момент поверхні керування має нелінійний характер, то рішення диференціального рівняння (1), тобто визначення амплітуди коливань поверхні керування при виникненні трансзвукового флатера, можна отримати за допомогою методу енергетичного балансу [7]. Згідно з цим методом амплітуду коливань аеродинамічної поверхні керування можна визначити з рівності роботи розподіленого збудженого шарнірного моменту і суми робіт розподілених шарнірних моментів від сил аеродинамічного демпфування та від сил конструкційного демпфування за один період коливань аеродинамічної поверхні керування:

$$\int_0^T \bar{M}_c(\dot{\delta}) \dot{\delta}(t) dt \approx \int_0^T \bar{M}_a(\dot{\delta}) \dot{\delta}(t) dt + \int_0^T \bar{M}_k(\dot{\delta}) \dot{\delta}(t) dt, \quad (3)$$

де T — період коливань аеродинамічної поверхні керування.

Для оцінки величини розподіленого збудженого шарнірного моменту аеродинамічної поверхні керування з урахуванням аеродинамічної компенсації скористаємося адаптованою математичною моделлю, яка була запропонована у праці [8] і яку у даному випадку можна подати у вигляді

$$\bar{M}_c(\dot{\delta}) \approx \Delta P_0 (b_k - b_0)^2 \left(\frac{b_1 + b_k - b_0}{2b_1 + b_k - b_0} \right) \frac{b_1}{\phi_0 V} \times \dot{\delta}(t) \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{b_k - b_0}{b_1} \right) \frac{b_1}{\phi_0 V} |\dot{\delta}(t)| \right], \quad (4)$$

де ΔP_0 — максимальна величина зміни тиску місцевого надзвукового потоку на профілі аеродинамічної поверхні керування при розташуванні стрибків ущільнення на задній кромці профілю та при відсутності коливань, b_k — хорда профілю аеродинамічної поверхні керування, b_1 — відстань від лінії максимальної товщини аеродинамічного профілю до його задньої кромки, b_0 — відстань від осі обертання аеродинамічної поверхні керування до передньої кромки (величина аеродинамічної компенсації поверхні керування), V — швидкість потоку повітря, ϕ_0 — максимальний кут нахилу дотичної до профілю аеродинамічної поверхні керування, тобто кут нахилу дотичної поблизу задньої кромки профілю за умови відсутності коливань аеродинамічної поверхні керування (рис. 1).

З результатів лабораторних досліджень [1, 3, 6] відомо, що коливання аеродинамічних поверхонь керування при виникненні трансзвукового флатера близькі до гармонічних, тобто:

$$\delta(t) \approx \delta_0 \sin \omega t, \quad (5)$$

де δ_0 — амплітуда коливань аеродинамічної поверхні керування при виникненні трансзвукового флатера.

З урахуванням залежності (5) робота збудженого розподіленого шарнірного моменту аеродинамічної поверхні керування (4) за один період коливань може бути подана інтегралом

$$\bar{W}_c(\dot{\delta}) \approx \Delta P_0 (b_l - b_0)^2 \left(\frac{b_l + b_k - b_0}{2b_l + b_k - b_0} \right) \frac{b_l \omega^2}{\varphi_0 V} \times \times \delta_0^2 \int_0^T \cos^2 \omega t \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{b_k - b_0}{b_l} \right) \frac{b_l \omega}{\varphi_0 V} \delta_0 |\cos \omega t| \right] dt. \quad (6)$$

Інтеграл (6) є табличним інтегралом, який дорівнює

$$\bar{W}_c(\dot{\delta}) \approx \pi \Delta P_0 (b_k - b_0)^2 \left(\frac{b_l + b_k - b_0}{2b_l + b_k - b_0} \right) \times \times \left[1 - \frac{4}{3\pi} \left(1 + \frac{b_k - b_0}{b_l} \right) \frac{b_l \omega}{\varphi_0 V} |\delta_0| \right] \frac{b_l \omega}{\varphi_0 V} \delta_0^2. \quad (7)$$

Отримане рівняння (7) дозволяє визначити роботу розподілених збуджених шарнірних моментів за один період коливань аеродинамічних поверхонь керування з урахуванням їхньої аеродинамічної компенсації.

Роботу розподілених шарнірних моментів поверхонь керування з урахуванням їхньої аеродинамічної компенсації від сил аеродинамічного демпфування оцінимо за допомогою гіпотези «динамічного скривлення» аеродинамічного профілю [4], згідно з якою аеродинамічні характеристики профілю, який коливається, не відрізняються від характеристик сталого профілю, скривленого таким чином, що зміна місцевих кутів його обтікання потоком повітря задовольняє умову

$$\Delta \delta(x; \dot{\delta}) = \frac{x_c}{V} \dot{\delta}(t), \quad (8)$$

де x_c — відстань перерізу «с» ділянок хорди профілю аеродинамічної поверхні керування від осі обертання.

Складові шарнірного моменту аеродинамічної поверхні керування, обумовлені силами аеродинамічного демпфування, у даному випадку обумовлені як динамічним кутом атаки ділянок хорди профілю аеродинамічної поверхні керування (8), так і динамічною кривизною ділянок хорди профілю поверхні керування, які розташовані попереду і позаду від осі обертання поверхні керування.

Розподілену силу аеродинамічного демпфування, обумовлену динамічним кутом атаки цих ділянок, можна визначити відомою залежністю [5]

$$\Delta \bar{F}_1(x; \dot{\delta}) \approx C_y^\delta \frac{q}{V} [b_0 x_0 + (b_k - b_0) x_k] \dot{\delta}(t), \quad (9)$$

де C_y^δ — похідна піднімальної сили за кутом атаки профілю поверхні керування, q — швидкісний напір незбудженого потоку повітря, x_0 — переріз хорди профілю попереду від осі обертання поверхні керування, x_k — переріз хорди профілю позаду від осі обертання поверхні керування.

Максимальна величина розподілених складових піднімальної сили аеродинамічного демпфірування на цих ділянках хорди профілю поверхні керування, як впливає з аналізу рівняння (9), буде

$$\Delta \bar{F}_0(\dot{\delta}) \approx C_y^\delta \frac{q}{V} [b_0^2 + (b_k - b_0)^2] \dot{\delta}(t). \quad (10)$$

Середня величина піднімальної сили аеродинамічного демпфування, обумовлена динамічним кутом атаки профілю аеродинамічної поверхні керування (8), дорівнює половині максимальної величини її складових (10), центри тиску яких розташовані на відстані $2/3$ хорди цих ділянок від осі обертання поверхні керування.

З наведеного і з рівняння (10) випливає, що максимальна величина розподіленого шарнірного моменту аеродинамічної поверхні керування, яка обумовлена цими складовими піднімальної сили аеродинамічного демпфування, дорівнює

$$\Delta \bar{M}_1(\dot{\delta}) \approx -\frac{1}{3} C_y^\delta \frac{q}{V} [b_0^3 + (b_k - b_0)^3] \dot{\delta}(t). \quad (11)$$

Як було вказано вище, крім складової піднімальної сили, обумовленої динамічним кутом атаки профілю аеродинамічної поверхні керування, на профіль діють демпфуючі сили, обумовлені динамічною кривизною цих ділянок хорди профілю.

Величини цих складових піднімальної сили визначимо за допомогою наближеної формули С. А. Чаплигіна [13], яку у даному випадку можна подати у вигляді

$$\Delta \bar{F}_2(f; \dot{\delta}) \approx 2C_y q [f_0(\dot{\delta}) + f_k(\dot{\delta})], \quad (12)$$

де $f_0(\dot{\delta})$ — максимальна величина динамічного скривлення ділянки хорди профілю, розташованої попереду від осі обертання поверхні керування, $f_k(\dot{\delta})$ — максимальна величина динамічного скривлення ділянки хорди профілю, яка розташована позаду від осі обертання поверхні керування.

Можливість використання формули С. А. Чаплигіна при виконанні наближених інженерних оцінок у динамічних задачах аеропружності доведено у роботі [9] шляхом порівняння теоретичних результатів з експериментальними.

Величини динамічного скривлення цих ділянок хорди профілю визначаються інтегралами від динамічного кута атаки (8) цих ділянок:

$$f_0(x_0; \dot{\delta}) = \int \frac{x_0}{V} \dot{\delta}(t) dx = \frac{1}{2} \frac{x_0^2}{V} \dot{\delta}(t), \quad (13)$$

$$f_k(x_k; \dot{\delta}) = \int \frac{x_k}{V} \dot{\delta}(t) dx = \frac{1}{2} \frac{x_k^2}{V} \dot{\delta}(t). \quad (14)$$

Максимальна величина динамічного скривлення ділянки хорди профілю, розташованої попереду від осі обертання поверхні керування, спостерігається при $x_0 = 0.5b_0$. Як впливає з рівняння (13), вона дорівнює

$$f_0(\dot{\delta}) = \frac{1}{8} \frac{b_0^2}{V} \dot{\delta}(t). \quad (15)$$

Максимальна величина динамічного скривлення ділянки хорди профілю, яка розташована позаду від осі обертання поверхні керування, спостерігається при $x_k = 0.5(b_k - b_0)$. Як впливає з рівняння (14), вона дорівнює

$$f_k(\dot{\delta}) = \frac{1}{8} \frac{(b_k - b_0)^2}{V} \dot{\delta}(t). \quad (16)$$

Центри тиску складових сил демпфування, обумовлених динамічною кривизною профілю, розташовані посередині цих ділянок, тому максимальну величину розподіленого шарнірного моменту поверхні керування від цих сил можна, з урахуванням залежностей (12), (15) і (16), подати у вигляді

$$\Delta \bar{M}_2(\dot{\delta}) \approx -\frac{1}{8} C_y \frac{q}{V} [b_0^3 + (b_k - b_0)^3] \dot{\delta}(t). \quad (17)$$

Таким чином, сумарна розподілена величина шарнірного моменту поверхні керування від сил аеродинамічного демпфування дорівнює сумі його складових, визначених рівняннями (11) і (17):

$$\bar{M}_a(\dot{\delta}) \approx -0.458 C_y \frac{q}{V} [b_0^3 + (b_k - b_0)^3] \dot{\delta}(t). \quad (18)$$

Враховуючи гармонічний характер коливань аеродинамічної поверхні керування (5), роботу розподіленого шарнірного моменту аеродинамічної поверхні керування від сил аеродинамічного демпфування (18) за один період коливань у рівнянні (3) можна визначити інтегралом

$$\bar{W}_a(\dot{\delta}) \approx 0.458 C_y \frac{q}{V} \omega^2 \delta_0^2 [b_0^3 + (b_k - b_0)^3] \int_0^T \cos^2 \omega t dt. \quad (19)$$

Інтеграл (19) є табличним, і дорівнює

$$\bar{W}_a(\dot{\delta}) \approx 0.458 \pi C_y \frac{q}{V} [b_0^3 + (b_k - b_0)^3] \omega \delta_0^2. \quad (20)$$

Аналогічно можна отримати і роботу розподілених шарнірних моментів від сил конструкційного демпфування (2) за один період коливань поверхні керування

$$\bar{W}_k(\dot{\delta}) = \frac{1}{\pi} \bar{J}_k \omega^3 \delta_0^2 \int_0^T \cos^2 \omega t dt = \bar{J}_k \omega^2 \delta_0^2. \quad (21)$$

З метою порівняння збудженого шарнірного моменту поверхні керування і шарнірного моменту, обумовленого силами аеродинамічного і конструкційного демпфування, нагадаємо відомі залежності [2]:

$$q = \frac{1}{2} \rho_H V^2 = \frac{1}{2} k M^2 P_H, \quad (22)$$

де ρ_H — густина повітря на висоті польоту, k — показник адіабати (для повітря $k \approx 1.405$), M — число Маха польоту літака, P_H — тиск повітря на висоті польоту.

Враховуючи залежність (22), з рівності робіт розподілених збуджених шарнірних моментів аеродинамічної поверхні керування (7), шарнірних моментів від сил аеродинамічного демпфування (20) та від сил конструкційного демпфування (21) отримаємо амплітуду коливань аеро-

динамічної поверхні керування при виникненні трансзвукового флатера

$$\delta_0 \approx \frac{3}{4} \frac{\pi \varphi_0 V_\phi}{(b_1 + b_k - b_0) \omega} \left\{ 1 - \right. \\ \left. - [(0.229 \pi C_y^\alpha \rho_H V_\phi^2 \varphi_0 (b_0^3 + (b_k - b_0)^3) + \right. \\ \left. + \bar{J}_k \omega \varphi_0 V_\phi) (2b_1 + b_k - b_0)] : \right. \\ \left. : [\pi \Delta P_0 b_1 (b_k - b_0)^2 (b_1 + b_k - b_0)] \right\}, \quad (23)$$

де V_ϕ — швидкість потоку повітря, при якій виникає трансзвуковий флатер аеродинамічної поверхні керування.

Максимальна величина ΔP_0 зміни тиску місцевого надзвукового потоку на профілі аеродинамічної поверхні керування у рівнянні (23) не залежить від аеродинамічної компенсації поверхонь керування і може бути визначена відомою залежністю [9]

$$\Delta P_0 \approx P_H (M_1 - M_\infty), \quad (24)$$

де M_1 — максимальне число Маха місцевого надзвукового потоку на поверхні керування при умові розташування стрибків ущільнення на задній кромці профілю та при умові відсутності коливань, M_∞ — число Маха незбудженого потоку повітря, при якому стрибки ущільнення досягають задньої кромки профілю.

Максимальне число M_1 у рівнянні (24) визначається відомою наближеною залежністю [9]

$$M_1 \approx \sqrt[3]{1 + 11.5 \varphi_0}. \quad (25)$$

Число M_∞ незбудженого потоку повітря у рівнянні (24) визначається з умови формування стрибків ущільнення на поверхні аеродинамічного профілю [9]

$$M_1 - 1 \approx 2(M_\infty - M_{кр}), \quad (26)$$

де $M_{кр}$ — критичне число Маха аеродинамічного профілю.

Швидкість потоку повітря V_ϕ у рівнянні (23) можна визначити таким чином.

При коливаннях поверхні керування максимальний кут обтікання профілю аеродинамічної поверхні керування місцевим надзвуковим потоком з урахуванням аеродинамічної компенсації зменшується на величину

$$\Delta \varphi(\delta) = \frac{b_k - b_0}{V_\phi} \dot{\delta}(t). \quad (27)$$

У роботі [8] доведено, що максимальна величина збудженого шарнірного моменту поверхні керування спостерігається при умові

$$\dot{\delta}(t) = \frac{\varphi_0 V_\phi}{b_1 + b_k}. \quad (28)$$

З урахуванням аеродинамічної компенсації поверхні керування умова (28) може бути подана у вигляді

$$\dot{\delta}(t) = \frac{\varphi_0 V_\phi}{b_1 + b_k - b_0}. \quad (29)$$

Зі спільного рішення залежностей (27) і (29) отримаємо

$$\Delta \varphi(\delta) = \varphi_0 \frac{b_k - b_0}{b_1 + b_k - b_0}. \quad (30)$$

З урахуванням залежності (25) та умови (30) число M місцевого надзвукового потоку на поверхні профілю, при якому спостерігається виникнення трансзвукового флатера, дорівнює

$$M_{1\phi} \approx \sqrt[3]{1 + 11.5(\varphi_0 - \Delta \varphi)} = \\ = \sqrt[3]{1 + 11.5 \frac{b_1}{b_1 + b_k - b_0} \varphi_0}. \quad (31)$$

Число M незбудженого потоку повітря M_ϕ , при якому виникає трансзвуковий флатер аеродинамічної поверхні керування, можна визначити з умови формування стрибків ущільнення на поверхні аеродинамічного профілю:

$$M_{1\phi} - 1 \approx 2(M_\phi - M_{кр}). \quad (32)$$

При визначеній з умови (32) величині числа M_ϕ швидкість потоку повітря V_ϕ , як впливає із залежності (22), дорівнює

$$V_\phi = M_\phi \sqrt{k(P_H / \rho_H)} = a_H M_\phi, \quad (33)$$

де a_H — швидкість звуку на висоті польоту.

Але необхідно зробити такі зауваження.

1. Швидкість потоку повітря V_ϕ , яка визначається з рівнянь (22) і (31) — (33), тобто з урахуванням аеродинамічної компенсації поверхні керування, практично не відрізняється від швидкості незбудженого потоку повітря, при якій виникає трансзвуковий флатер аеродинамічної по-

верхні керування без аеродинамічної компенсації. Тому для наближеної кількісної оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхонь керування на рівень їхніх коливань швидкість потоку повітря V_ϕ можна вважати постійною величиною, яка отримується при $b_0 = 0$.

2. На реальних конструкціях літаків при зміні аеродинамічної компенсації поверхонь керування змінюються як розподілений масовий момент інерції аеродинамічних поверхонь керування, так і частота власних пружних коливань поверхонь керування.

Розподілений масовий момент інерції аеродинамічної поверхні керування з урахуванням аеродинамічної компенсації поверхонь керування можна подати відомою наближеною залежністю [14]:

$$\begin{aligned} \bar{J}_a &\approx \int_0^{b_0} \frac{\bar{m}}{b_k} x_0^2 dx + \int_0^{b_k-b_0} \frac{\bar{m}}{b_k} x_k^2 dx \approx \\ &\approx \frac{1}{3} \bar{m} (b_k^2 - 3b_k b_0 + 3b_0^2), \end{aligned} \quad (34)$$

де $\bar{m}$ — розподілена маса аеродинамічної поверхні керування.

З аналізу рівняння (34) випливає, що зі збільшенням величини аеродинамічної компенсації поверхонь керування зменшується величина розподіленого масового моменту інерції аеродинамічної поверхні керування і, як можна бачити з рівняння (23), це призводить до збільшення рівня коливань поверхні керування. З іншого боку, зменшення розподіленого масового моменту інерції аеродинамічної поверхні керування призводить до збільшення частоти власних пружних коливань поверхні керування, і, як наслідок, до зменшення рівня коливань.

Частота власних пружних коливань поверхні керування визначається відомою залежністю [12]

$$\omega^2 = \frac{c}{\bar{J}_k}, \quad (35)$$

де c — жорсткість конструкції системи «привід — аеродинамічна поверхня керування».

Оскільки при зміні величини аеродинамічної компенсації жорсткість конструкції системи «привід — аеродинамічна поверхня керування», як правило, залишається незмінною, то із залежності (35) маємо

$$\omega^2 \bar{J}_k = \text{const}. \quad (36)$$

На основі залежності (36) частоту власних пружних коливань поверхні керування при зміні величини аеродинамічної компенсації можна визначити залежністю

$$\omega_a = \omega \sqrt{\frac{\bar{J}_k}{\bar{J}_a}}. \quad (37)$$

Зміну частоти власних пружних коливань поверхні керування при зміні величини аеродинамічної компенсації згідно із залежністю (37) необхідно враховувати як при оцінці роботи збуджених шарнірних моментів аеродинамічних поверхонь керування, так і при оцінці роботи шарнірних моментів аеродинамічних поверхонь керування від сил аеродинамічного демпфування.

Що стосується оцінки роботи шарнірних моментів аеродинамічних поверхонь керування від сил конструкційного демпфірування при зміні величини аеродинамічної компенсації, то необхідно додати наступне.

Оскільки добуток (36) не залежить від величини аеродинамічної компенсації поверхні керування, то і робота розподілених шарнірних моментів від сил конструкційного демпфування поверхні керування (21) також не залежить від величини аеродинамічної компенсації.

З урахуванням цих зауважень рівняння (23) оцінки впливу аеродинамічної компенсації поверхонь керування на рівень їхніх коливань при виникненні трансзвукового флатера може бути подане у вигляді

$$\begin{aligned} \delta_0 &\approx \frac{3}{4} \frac{\pi \varphi_0 V_\phi}{(b_1 + b_k - b_0) \omega} \left\{ 1 - \right. \\ &- [(0.229 \pi C_y^\alpha \rho_H V_\phi^2 \varphi_0 (b_0^3 + (b_k - b_0)^3) + \\ &+ \bar{J}_k \omega \varphi_0 V_\phi) (2b_1 + b_k - b_0)] : \\ &: [\pi \Delta P_0 b_1 (b_k - b_0)^2 (b_1 + b_k - b_0)] \left. \right\}. \end{aligned}$$

РОЗРАХУНОК РІВНЯ КОЛИВАНЬ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ПОВЕРХНІ КЕРУВАННЯ

Для кількісної наближеної оцінки рівня з урахуванням їхньої аеродинамічної компенсації були прийняті вихідні дані з роботи [9].

а. Характеристики аеродинамічного профілю та аеродинамічної поверхні керування

Відстань b_1 лінії максимальної товщини аеродинамічного профілю від його задньої кромки, м	1.5
Середня аеродинамічна хорда b_k поверхні керування, м	0.75
Розподілений масовий момент інерції $\bar{J}_k$ аеродинамічної поверхні керування без аеродинамічної компенсації, Н·с ²	1.0
Логарифмічний декремент ψ коливань поверхні керування	0.7
Кутова частота ω власних коливань поверхні керування без аеродинамічної компенсації, рад/с	239
Похідна C_y^δ коефіцієнта піднімальної сили аеродинамічної поверхні керування літака за кутом її відхилення	2π
Максимальний кут $\varphi_0 \approx 0.85\tau$ нахилу дотичної до профілю поверхні керування для типових профілів ЦАГИ, рад	0.0357
Критичне число $M_{кр}$ аеродинамічного профілю	0.8794
Густина ρ_H повітря на висоті польоту, Н·с ² /м ²	1.25

б. Розрахункові дані для визначення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування при виникненні флатера при $b_0 = 0$:

Максимальне число M_1 місцевого надзвукового потоку на поверхні керування за умов розташування стрибків ущільнення на задній кромці профілю	1.121
Число M_∞ незбудженого потоку повітря, при якому стрибки ущільнення досягають задньої кромки профілю	0.94
Число $M_{1ф}$ місцевого надзвукового потоку на поверхні керування, при якому виникає трансзвуковий флатер	1.084
Число M_ϕ незбудженого потоку повітря, при якому виникає трансзвуковий флатер	0.9214
Швидкість V_ϕ потоку повітря, при якій виникає трансзвуковий флатер аеродинамічної поверхні керування, м/с	313.5
Максимальна величина зміни тиску ΔP_0 місцевого надзвукового потоку на профілі аеродинамічної поверхні керування, Н·м ⁻²	18700

Результати розрахунків оцінки впливу аеродинамічної компенсації на рівень коливань поверхонь керування подані на рис. 2, на якому наведено залежність амплітуди δ_0 коливань аеродинамічної поверхні керування при виникненні трансзвукового флатера від відносної величини аеродинамічної компенсації поверхні керування $\bar{b}_0 = b_0 / b_k$. Видно, що при збільшенні відносної

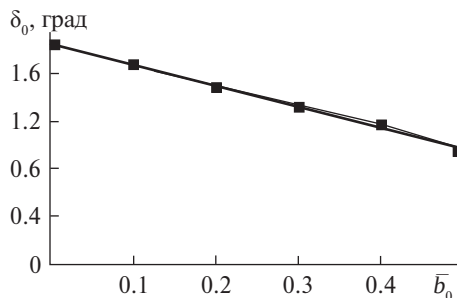


Рис. 2. Залежність рівня коливань аеродинамічної поверхні керування при виникненні трансзвукового флатера від відносної величини аеродинамічної компенсації поверхні керування

величини аеродинамічної компенсації поверхні керування від $\bar{b}_0 = 0$ до $\bar{b}_0 = 0.5$ рівень коливань аеродинамічної поверхні керування зменшується від значення $\delta_0 \approx 1.84^\circ$ (як у роботі [9]) до $\delta_0 \approx 0.95^\circ$ практично за лінійним законом.

Зауважимо, що у даному випадку зменшення рівня коливань аеродинамічної поверхні керування здійснюється без збільшення жорсткості конструкції системи «привід — аеродинамічна поверхня керування», тобто без збільшення ваги літака. Тому цей спосіб зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування при виникненні трансзвукового флатера можна рекомендувати для практичної реалізації на реальних конструкціях надзвукових та гіперзвукових літаків.

ВИСНОВКИ

Результатами розрахунків доведено можливість зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування надзвукових та гіперзвукових літаків при виникненні трансзвукового флатера шляхом збільшення аеродинамічної компенсації поверхонь керування за умов незмінності величини жорсткості конструкції системи «привід — аеродинамічна поверхня керування».

Запропоновану математичну модель оцінки впливу аеродинамічної компенсації на рівень коливань поверхонь керування при виникненні трансзвукового флатера можна використати для попередньої наближеної оцінки аеропружних характеристик надзвукових та гіперзвукових літаків.

З наведеного також випливає, що пошук ефективних засобів зменшення рівня коливань аеродинамічних поверхонь керування при виник-

ненні трансзвукового флатера літаків залишається актуальною науковою і прикладною проблемою, чому і доцільно присвятити наступні дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Аэродинамическое исследование колеблющейся поверхности управления при трансзвуковых скоростях.* — М.: ЦАГИ, 1975. — Обзор № 456. — 105 с.
2. *Гошек И.* Аэродинамика больших скоростей. — М.: ИЛ, 1954. — 547 с.
3. *Калмыков Л. А., Левкин В. Ф., Нуштаев П. Д.* Исследование аэродинамических производных аэродинамического момента органов управления // Тр. ЦАГИ. — 1968. — 32 с.
4. *Келдыш М. В.* Избранные труды. Механика. — М.: Наука, 1985. — 568 с.
5. *Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С.* Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. — М.: Оборонгиз, 1962. — 548 с.
6. *Левкин В. Ф.* Экспериментальные исследования нестационарных аэродинамических характеристик поверхностей управления при трансзвуковых скоростях // Тр. ЦАГИ. — Вып. 2132. — 1982. — 16 с.
7. *Пановко Я. Г.* Введение в теорию механических колебаний. — М.: Наука, 1980. — 272 с.
8. *Сафронов О. В., Неділько О. М., Сафронов В. О.* Адаптована математична модель оцінки збуджених шарнірних моментів аеродинамічних поверхонь керування надзвукових літаків на трансзвукових швидкостях польоту // Зб. наук. праць ЦВСД НУОУ. — 2014. — № 3 (52). — С. 28—33.
9. *Сафронов О. В., Неділько О. М., Сафронов В. О.* Порівняльний аналіз теоретичних та розрахунково-експериментальних методів оцінки характеристик трансзвукового флатера // Зб. наук. праць ЦВСД НУОУ. — 2015. — № 1 (53). — С. 41—48.
10. *Сафронов О. В., Неділько О. М.* Математична модель оцінки максимально можливих величин збуджених шарнірних моментів аеродинамічних поверхонь керування при виникненні трансзвукового флатера // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. — 2016. — № 4 (25). — С. 19—23.
11. *Семон Б. Й., Сафронов О. В., Неділько О. М.* Трансзвуковий флатер: від MiG-25 до Space Ship Two // Наука і оборона. — 2016. — № 3. — С. 32—35.
12. *Стрелков С. П.* Введение в теорию колебаний. — М.: Наука, 1964. — 440 с.
13. *Чаплыгин С. А.* О давлении плоскопараллельного потока на преграждающие тела // Избранные тр. Механика жидкости и газа. Математика. Общая механика. — М.: Наука, 1976. — С. 97—130.

14. *Яковлев К. П.* Краткий физико-технический справочник. — М.: Физматгиз, 1960. — Том II. — 412 с.

Стаття надійшла до редакції 05.04.18

REFERENCES

1. Aerodynamic study of an oscillating control surface at transonic velocities, Moscow: TsAGI, 1975, No. 456, 105 p. [in Russian].
2. Goshek I. (1954). Aerodynamics of high speeds, Moscow: IL, 547 p. [in Russian].
3. Kalmukov L. A., Levkin V. F., Nushtaev P. D. (1968). Investigation of aerodynamic derivatives of the aerodynamic moment of control elements, Papers of TsAGI, 32 p. [in Russian].
4. Keldish M. V. (1985). Izbrannye trudi. Mekhanika. [Selected works. Mechanics], Moscow: Science, 568 p. [in Russian].
5. Lebedev A. A., Chernobrovkin L. S. (1962). Dynamics of flight of unmanned aerial vehicles, Moscow: Oborongiz, 548 p. [in Russian].
6. Levkin V. F. (1982). Experimental studies of non-stationary aerodynamic characteristics of control surfaces at transonic speeds, Papers of TsAGI, issue 2132, 16 p. [in Russian].
7. Panovko J. G. (1980). Introduction to the theory of mechanical oscillations, Moscow: Science, 272 p. [in Russian].
8. Safronov A. V., Nedilko A. N., Safronov V. A. (2014). Adaptive mathematical model of assessment of excited hinge moments of supersonic aircraft aerodynamic control surfaces on transonic airspeed, Research Papers Collection of the Center of military and strategic studies of the National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, No. 3(52), pp. 28—33 [in Ukrainian].
9. Safronov A. V., Nedilko A. N., Safronov V. A. (2015). Comparative analysis of theoretical and calculation and experimental methods to assess transonic flutter characteristics, Research Papers Collection of the Center of military and strategic studies of the National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, No. 1(53), pp. 41—48 [in Ukrainian].
10. Safronov A. V., Nedilko A. N. (2016). Mathematical model of estimation of maximum possible values of excited hinge moments of aerodynamic surfaces of control in the occurrence of transonic flutter, Science and Technology of the Air Force of Ukraine, No. 4(25), pp. 19—23 [in Ukrainian].
11. Semon B. I., Safronov A. V., Nedilko A. N. (2016). Transonic Flutter: from MiG-25 to Space Ship Two, Science and Defense, No. 3, pp. 32—35 [in Ukrainian].
12. Strelkov C. P. (1964). Introduction to the theory of oscillations, Moscow: Nauka, 440 p. [in Russian].

13. Chapligin C. A. (1976). On the pressure of a plane-parallel flow on barrier bodies, Selected Works, Mechanics of Fluids and Gas. Mathematics. General mechanics, pp. 97–130 [in Russian].
14. Jakovlev K. P. (1960). Brief physicotekhnical handbook, volume II, Moscow: Fizmatgiz, 412 p. [in Russian].

Received 05.04.18

А. В. Сафронов, Б. Й. Семон, А. Н. Недилько

Национальный университет обороны Украины
имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ТРАНСЗВУКОВОГО ФЛАТТЕРА

Случаи возникновения интенсивных колебаний элементов конструкций сверхзвуковых авиационных и авиационно-космических летательных аппаратов на околозвуковых числах M полета имеют место в современной практике их эксплуатации. Некоторые из этих случаев заканчивались тяжелыми летными происшествиями, поэтому проблема уменьшения уровня колебаний аэродинамических поверхностей управления сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов при возникновении трансзвукового флаттера остается актуальной. Целью статьи является оценка возможности уменьшения уровня колебаний за счет аэродинамической компенсации поверхности управления и разработка математической модели оценки влияния аэродинамической компенсации поверхностей управления на уровень их колебаний при возникновении трансзвукового флаттера. Для решения этой проблемы проведен анализ публикаций, которые посвящены данной тематике, и в которых изложены материалы лабораторных и натурных исследований данного явления. Поскольку колебания аэродинамических поверхностей управления при возникновении трансзвукового флаттера относятся к автоколебаниям с амплитудой граничного цикла, то есть относятся к нелинейным колебаниям, поэтому математическую модель оценки влияния аэродинамической компенсации поверхности управления на уровень их колебаний представлено в виде обычного дифференциального уравнения второго порядка с нелинейной правой частью. Для решения дифференциального уравнения данного типа был использован метод энергетического баланса, с помощью которого определялась амплитуда колебаний аэродинамических поверхностей управления. По результатам расчетов на основании предложенной модели получена зависимость уровня колебаний аэродинамических поверхностей управления от величины их аэродинамичес-

кой компенсации, которая может быть предложена для предварительной оценки аэроупругих характеристик сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов.

Ключевые слова: математическая модель, аэродинамическая поверхность управления, шарнирный момент, аэродинамическая компенсация, трансзвуковой флаттер, сверхзвуковой самолет.

A. V. Safronov, B. Y. Semon, A. N. Nedilko

The National Defence University of Ukraine named
after Ivan Cherniakhovsyi, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATION OF THE EFFECT OF AERODYNAMIC AIRCRAFT CONTROL SURFACES COMPENSATION ON THE LEVEL OF THEIR VIBRATIONS IN CASE OF TRANSONIC FLUTTER

There are cases of intense fluctuations of supersonic aircraft and aviation-space aircrafts structures elements around the sound numbers M in the current practice of their exploitation. Some of these cases ended in serious flight events. That is why the possibility of reducing oscillations level of aerodynamic control surfaces for supersonic and hypersonic airplanes in the event of transonic flutter is actual. Our purpose is to evaluate the possibility of reducing the level of oscillation due to the aerodynamic compensation of the surface of the control and to develop a mathematical model for assessing the impact of aerodynamic compensation of the surfaces of control on the level of their oscillations in the event of a transonic flutter.

In order to solve this problem, an analysis of publications devoted to this topic has been conducted, in which the materials of laboratory and field studies of this phenomenon are presented. Since the fluctuations of aerodynamic control surfaces in the event of a transonic flutter are referred to as self-oscillations with the amplitude of the boundary cycle, so they are referred to as nonlinear oscillations. The mathematical model for evaluating the effect of aerodynamic compensation of the control surface on the level of their oscillations is presented in the form of an ordinary differential equation of the second order with a nonlinear right-hand side. To solve the differential equation of this type, the energy balance method was used to determine the amplitude of the oscillations of the aerodynamic surfaces of control. According to the results of calculations, which were conducted with the help of the proposed model, the dependence of the oscillations level of aerodynamic surfaces of control on the magnitude of their aerodynamic compensation is obtained. In our opinion, it is useful to take it into account for the preliminary approximation of the aerospace characteristics of supersonic and hypersonic aircraft.

Keywords: mathematical model, aerodynamic aircraft control surface, the hinge moment, aerodynamic compensation, transonic flutter, supersonic aircraft.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.024>

УДК 004.62, 004.67

**Б. Я. Яйлимов¹, М. С. Лавренюк^{1,2}, А. Ю. Шелестов^{1,2},
А. В. Колотій^{1,2}, Г. О. Яйлимова³, О. П. Федоров¹**

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

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ІСТОТНИХ ЗМІННИХ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

Проведено дослідження та описано методи визначення індикаторів деградації земель. Дослідження у межах роботи дозволять сформулювати методи отримання кількісних оцінок землекористування та їхніх змін для території України. Для оцінки змін земного покриву аналізуються наявні джерела даних для території України. Розглянуто набори даних по території України для створення карт земного покриву та методики оцінки ґрунтово-рослинного покриву, зокрема для оцінки ступеня деградації земель та забезпечення рівня LDN (Land Degradation Neutrality) за підтримки ООН. Для оцінювання динаміки зміни земного покриву на території України обрано 2000, 2010 та 2016 рр. Як джерела даних використано власні карти, створені за розробленою методологією, що передбачає використання нейромережової класифікації часових рядів супутникових даних. Для 2000 та 2010 років карти земного покриву з просторовим розрізненням 30 м для всієї території України створені на основі зображень «Ландсат-4, -5, -7» у межах проекту FP-7 SIGMA. Проведений аналіз показав, що загальна точність глобальних карт земного покриву поступається регіональним картам земного покриву на 10 % для 2000 р. та на 12 % для 2010 р. Для 2016 р. створено карту на основі супутникових даних «Сентінель» із просторовим розрізненням 10 м. З використанням створених карт оцінено зміни земного покриву для 2000—2010 та 2000—2016 років. Оцінка проводилась для таких типів земного покриву: ліс — в необроблюваній землі, ліс — в оброблюваній землі, ліс — в голу землю. Ідентифіковано основні проблеми на території України, місця, де відбуваються масштабні зміни земного покриву. Також оцінено площі для кожного із переходів. Порівняно площі лісів, отримані на основі національних карт земного покриву із статистикою за три роки (2000, 2010 та 2016 рр.).

Ключові слова: істотні зміни, карта земного покриву, супутникові дані, деградація земель.

ВСТУП

Використання монокультур, порушення сівозмін, майже повна відмова від органічних добрив, зменшення частки бобових культур приводять до деґуміфікації ґрунтів, зменшення врожаїв і деградації земель в цілому. Така ситуація характерна для багатьох регіонів України. У світі для оцінки ступеня деградації земель та забезпечення рівня LDN (Land Degradation Neutrality) при підтримці ООН розроблено методики оцінки ґрунтово-рослинного покриву [26]. Метою LDN

є підтримка або моніторинг природних ресурсів землі та пов'язаної із цим наземної екосистеми. У межах глобальної програми підтримки, пілотного проекту комітету ООН з боротьби з опустелюванням та програми, спрямованої на забезпечення нейтрального рівня деградації ґрунтів, визначено ряд інформативних індикаторів, які дають можливість оцінювати поточний стан ґрунтів. Серед цих індикаторів виділено тренди змін рослинного покриву (Vegetative Land Cover Change), динаміка змін продуктивності ґрунтів (Land Productivity Dynamics — LPD) та тренди запасів вуглецю над та під землею (запаси органічного вуглецю ґрунту (soil organic carbon

© Б. Я. ЯЙЛИМОВ, М. С. ЛАВРЕНЮК, А. Ю. ШЕЛЕСТОВ,
А. В. КОЛОТІЙ, Г. О. ЯЙЛИМОВА, О. П. ФЕДОРОВ, 2018

(SOC)). Разом ці показники забезпечують всебічне висвітлення стану земних ресурсів у масштабі країни. Хоча ці показники і оцінюють стан земного покриття за різними критеріями, вони всі є релевантними. Карти земного покриття є джерелом інформації для індикації змін рослинного покриття [2—4]. Продуктивність земель дає можливість оцінювати здоров'я екосистеми в цілому. Вуглець сприяє зростанню рослин, переробці поживних речовин для підтримки родючості ґрунту, очищенню та зберіганню прісної води. Такі роботи цілком відповідають цілям сталого розвитку Сендайського фреймворку на 2015—2030 рр. [33].

Спостереження за змінами із врахуванням трьох показників LDN протягом 10—15 років може слугувати індикатором тенденцій деградації земель. Хоча ці три індикатори разом є придатними для моніторингу екосистеми, їхня агрегація буде приховувати зміни, виявлені в окремих частинах, що може вплинути на прийняття правильного рішення. Позитивна зміна одного з показників не може компенсувати негативні зміни в іншому, оскільки всі вони є доповнювальними, але не обов'язково адитивними компонентами наземних природних ресурсів. Тому, якщо один з показників показує негативну зміну, вважається, що відбувається деградація, навіть якщо інші є позитивними. Такі супутникові продукти створюють об'єктивну картину землекористування всієї країни [5—7].

В нашій роботі детально буде розглянуто перший індикатор (тренди змін земного покриття).

Дослідження в рамках роботи дозволять здійснити спостереження змін земного покриття на рівні всієї території України. В роботі представлено аналіз даних за офіційними статистичними джерелами та порівняння їх з отриманими на основі супутникових даних та історичних наземних даних.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗМІН ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

Для визначення змін земного покриття, які відбуваються із плином часу, необхідно володіти інформацією про її стан за декілька періодів часу. Зміни земного покриття повинні розраховуватися головним чином і максимально можли-

вою мірою з використанням порівнянних і стандартизованих національних джерел даних. Тільки при їхній відсутності або як додаток до національних даних слід використовувати глобальні джерела даних. Однак глобальні карти земного покриття — це мінімальний набір, який може бути доповнений національними (або субнаціональними) даними для більш точної картини деградації земель. У майбутньому всі країни повинні мати можливість здійснювати відповідний збір даних, отримувати та аналізувати інформацію про деградацію земель. При цьому глобальні джерела можуть усунути прогалини в національних даних і в кінцевому підсумку доповнити інформацію по країнам.

При встановленні показників інтенсивності використання земель сільськогосподарського призначення може бути визначений перелік сільськогосподарських культур, вирощування яких обмежується або забороняється з точки зору впливу на стан земель. У таких випадках можуть бути введені спеціальні режими здійснення сільськогосподарського виробництва.

Для розрахунку динаміки змін земного покриття рекомендується застосовувати багаторівневий підхід [26], а саме:

- рівень 1 (метод за замовчуванням): глобальне/регіональне спостереження Землі, аналіз геопросторової інформації та моделювання;
- рівень 2: національні статистичні дані, отримані для адміністративних частин країни;
- рівень 3 (найбільш детальний метод): польові дослідження, наземні вимірювання.

Такий ієрархічний підхід дозволяє використати всі наявні дані, забезпечити максимально можливу точність результатів оцінювання індикатора та масштабованість отриманих результатів. Основою для визначення змін земного покриття є карта класифікації земної поверхні. Розглянемо основні відомі джерела карт земного покриття.

ДЖЕРЕЛА ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН ЗЕМНОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Карти земного покриття відіграють важливу роль для осмислення динаміки екосистем та розв'язання багатьох задач супутникового моніторингу.

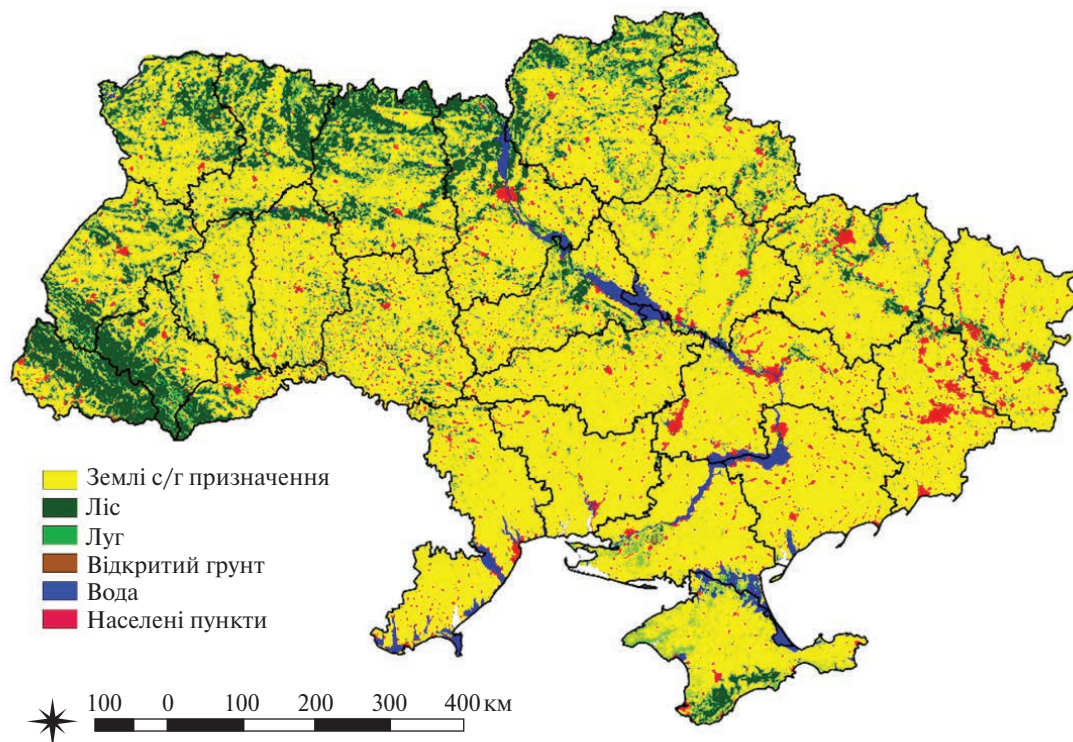


Рис. 1. Карта земного покриття 2010 (ESA CCI-LC)

Таблиця 1. Відомі глобальні карти земного покриття

Джерело даних	Рік	Розрізнення	URL
Mathews Global Vegetation/Land Use	1983	1 × 1 км	http://www.giss.nasa.gov/
Olson Land Cover and Vegetation	1983	0.5 × 0.5 км	http://www.grid.unep.ch/
Willson and Henderson-Sellers Global Land Cover	1985	1 × 1 км	http://www.ngdc.noaa.gov/
DeFries/Townshend-Global Land Cover	1995	10 × 10 км	http://glcf.umiacs.umd.edu/
GLCC (IGBP DISCover)	1997	1 × 1 км	http://edcdaac.usgs.gov/
UMD Land Cover	2000	1 × 1 км	http://glcf.umiacs.umd.edu/
MODIS Land Cover	2003	1 × 1 км	http://edcdaac.usgs.gov/
Vegetation Continuous Fields	2003	1 × 1 км	http://glcf.umiacs.umd.edu/
GLC-2000	2003	1 × 1 км	http://www.gvm.sai.jrc.it/
Vegetation Continuous Fields	2003	500 × 500 м	http://glcf.umiacs.umd.edu/
MODIS Land Cover	2008	500 × 500 м	http://edcdaac.usgs.gov/
GLOBCOVER	2009	300 × 300 м	http://www.esa.int/
GeoCover LCTM	2000	30 × 30 м	http://www.earthsat.com/
China Global Land Cover	2012	30 × 30 м	http://www.globallandcover.com/
GEO US Global Land Cover	2013	30 × 30 м	http://landcover.usgs.gov/

Зокрема, такі карти необхідні для визначення змін та тенденцій у землекористуванні. Проект GlobCover 2009 є другим 300-м глобальним продуктом, створеним автоматизованою класифікацією на основі MERIS FR часових рядів. В основі розрахунків використовується 22 класи земного покриву, що зареєстровані і використовуються в усьому світі [6]. Основним недоліком наявного продукту є те, що він містить всі землі сільськогосподарського призначення, а не оброблювані землі для поточного року, а також має низьке просторове розрізнення та малу точність. Побудова карт на основі даних низького розрізнення спричиняє недооцінку або переоцінку площ певних типів земного покриву чи їхніх змін.

В останні роки з'явилося кілька карт [1, 4, 7], які в роботі USGS [10] названі картами «нового покоління». Як видно із табл. 1, останні три продукти отримані на основі даних середнього розрізнення (наприклад, для побудови Globe Land30-2010 використано супутникові дані «Ландсат», що покривають всю Землю з просторовим розрізненням 30 м) [10]. Для побудови карти земного покриву розроблено автоматизований підхід, який базується на злитті попільських та об'єктно-орієнтованих методів класифікації (ПОК-based). Проте одним із основних недоліків побудованої карти є те, що серед отриманих класів немає відокремлених земель сільськогосподарського призначення, що використовувалися у поточному році. Також наявні карти не враховують територіальних відмінностей, пов'язаних із кліматом та різномірністю посівів, що проявляється для території України (наприклад, пустелю в Херсонській області на карті

GlobeLand30-2010 віднесено до земель сільськогосподарського призначення) або не покривають територію України (наприклад, карти, створені у межах програми CORINE) [8].

Одним із альтернативних джерел даних рослинного покриву, що можуть використовуватися для визначення змін земного покриву, є база даних змін клімату ESA (CCI-LC). Доступні на даний момент набори даних ESA-CCI-LC охоплюють три періоди: 2000 р., 2005 р. та 2010 р. Початкові набори даних ESA CCI-LC містять в собі 22 вихідних класи, об'єднані у шість основних класів земного покриву (табл. 2), оскільки всі землі земного покриву в країнах можуть бути класифіковані за цими класами.

Для отримання оцінки змін рослинного покриву використовуються періоди CCA-LC 2000 і 2010 ESA, з акцентом на зміни тільки між шістьма основними класами земного покриву (рис. 1).

Хоча набори даних ESA CCI-LC не створено для опису змін земного покриву, проте порівняння карт двох десятиліть дозволяє ідентифікувати основні тенденції зміни земного покриву.

ФОРМУВАННЯ НАБОРУ ДАНИХ ПО ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КАРТ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

За кілька останніх років стрімко зросла кількість новітніх інструментів для отримання, збереження та обміну інформацією про навколишнє середовище — запущені супутники із просторовим розрізненням 10...300 м («Ландсат-8», PROBA-V, «Сентінель-1» та «Сентінель-2»), що призвело до накопичення великих об'ємів даних різної природи, які є цінним джерелом інформації для дослідження Землі. Оскільки в останні роки актуальною стала задача побудови карт земного покриву для великих територій з використанням даних високого просторового розрізнення, то це стало можливим завдяки появі часового ряду даних із нових супутникових апаратів.

Серед великої кількості сучасних супутників, що використовуються для картографування земного покриву, є супутники із високим просторовим розрізненням, більшість із яких є лише в платному доступі. Проте за останні роки з'явилися радарні та оптичні безкоштовні супутникові дані (табл. 3).

Таблиця 2. Перелік класів, що містяться на картах земного покриву ESA CCI-LC

Значення	Клас
1	Ліси
2	Чагарники, луки
3	Землі сільськогосподарського призначення
4	Водно-болотні угіддя та водні об'єкти
5	Штучні ділянки
6	Гола земля

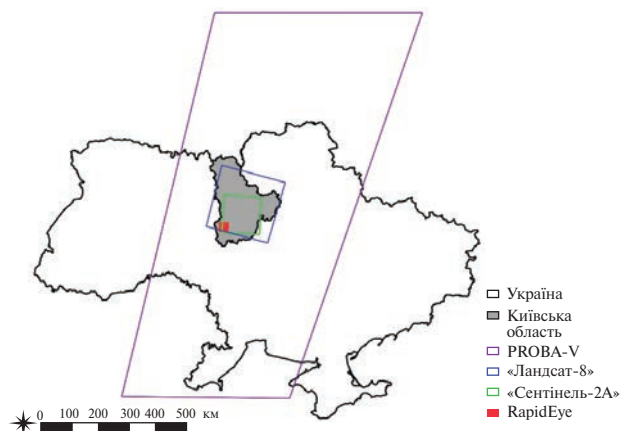


Рис. 2. Покриття частини України різними супутниковими даними

Для визначення змін земного покриття необхідно побудувати карти класифікації рослинного покриття. Для створення ретроспективних карт використовують супутникові дані «Ландсат», які покривають поверхню Землі кожні 16 днів. Проведені дослідження підтверджують ефективність застосування «Ландсат-8» для класифікації земного покриття [9, 11, 30, 35]. PROBA-V забезпечує покриття по всій планеті кожні два дні, ширина захвату однієї сцени 2250 км, що дозволяє отримувати часові ряди даних, які використовують для побудови карт земного покриття, відстеження динаміки зміни вегетації рослин та ін. [5]. При розв'язанні задачі картографування земного покриття нові можливості відкривають безкоштовні супутникові дані «Сентінель» із просторовим розрізненням 10 м, оскільки покривають територію кожні 5–6 днів [29] (рис. 2). Використання радарних та оптичних даних «Сентінель» дає можливість створювати карти нового покоління із розрізненням 10 м для точнішого визначення індикаторів деградації земель.

ПОБУДОВА КАРТ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ, ПОРІВНЯННЯ ЇХ ІЗ НАЯВНИМИ КАРТАМИ ТА АНАЛІЗ ЗМІН ЗЕМНОГО ПОКРИВУ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Для оцінювання динаміки зміни земного покриття на території України обрано 2000 та 2010 рр., оскільки саме ці проміжки часу є репрезентативними та дозволяють оцінити динаміку змін землекористування найбільш ефективно. При розв'язанні задачі побудови карт земного покриття території України використано дані космічних апаратів родини «Ландсат». Безкоштовні продукти обробки супутникової інформації, отримано з геоportалу геологічної служби США (United States Geological Survey) [2].

Для класифікації запропонована методологія, що передбачає використання нейромережевої класифікації часових рядів супутникових даних, на яких попередньо відновлена інформація в зашумарених областях, з подальшим об'єднанням отриманих карт для всієї території [15, 16, 18, 20, 21, 27, 28]. Розроблена методологія застосована для класифікації земного покриття території України за ретроспективними супутниковими даними. Використання інтелектуальних методів обробки часових рядів даних «Ландсат» дозволило забезпечити загальну точність класифікації даних за 1990, 2000 та 2010 рр. на рівні 97 % (на незалежній вибірці) (рис. 3).

Проведений аналіз показав, що загальна точність глобальних карт земного покриття поступається регіональним картам земного покриття на 10 % для 2000 р. та на 12 % для 2010 р. Особливо варто відзначити невисоку точність глобальних карт земного покриття для визначення посівних площ оброблюваних сільськогосподарських зе-

Таблиця 3. Основні характеристики космічних апаратів

Супутник	Розмір сцени або ширина захвату	Тип сенсора	Просторове розрізнення, м	Ціна
«Сентінель-1»	250 × 250 км ²	Радарний	10	Безкоштовно
«Сентінель-2»	100 км	Оптичний	10	»
«Ландсат-8»	185 × 180 км ²	»	30	»
PROBA-V	2250 км	»	100	»

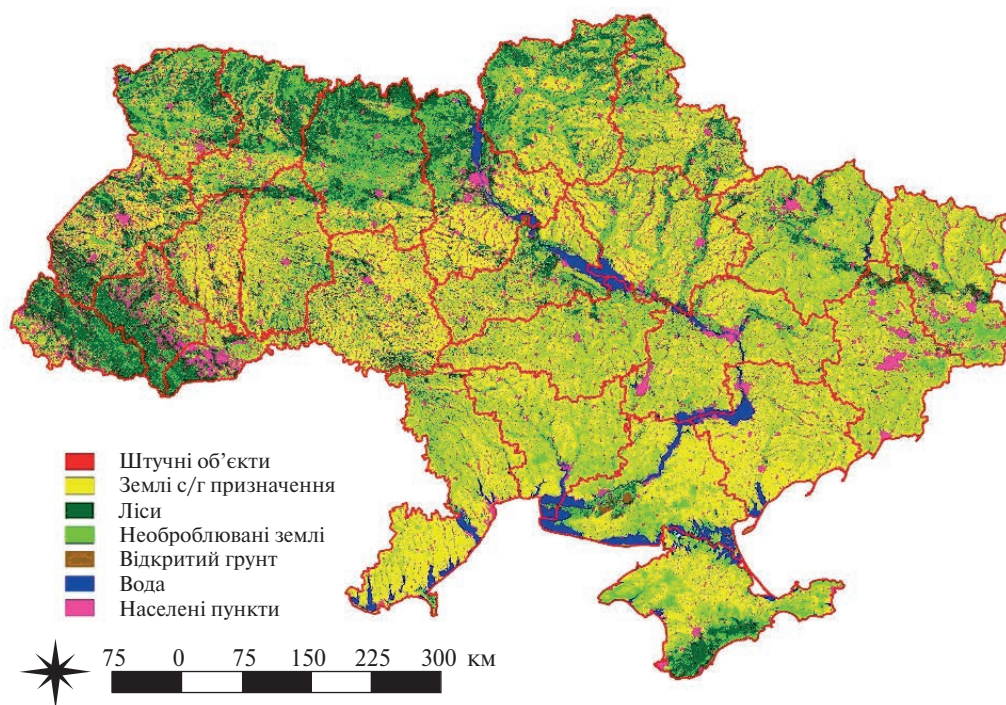


Рис. 3. Карта класифікації культур для всієї території України, на основі супутникових даних «Ландсат-5, -7» у 2010 р.

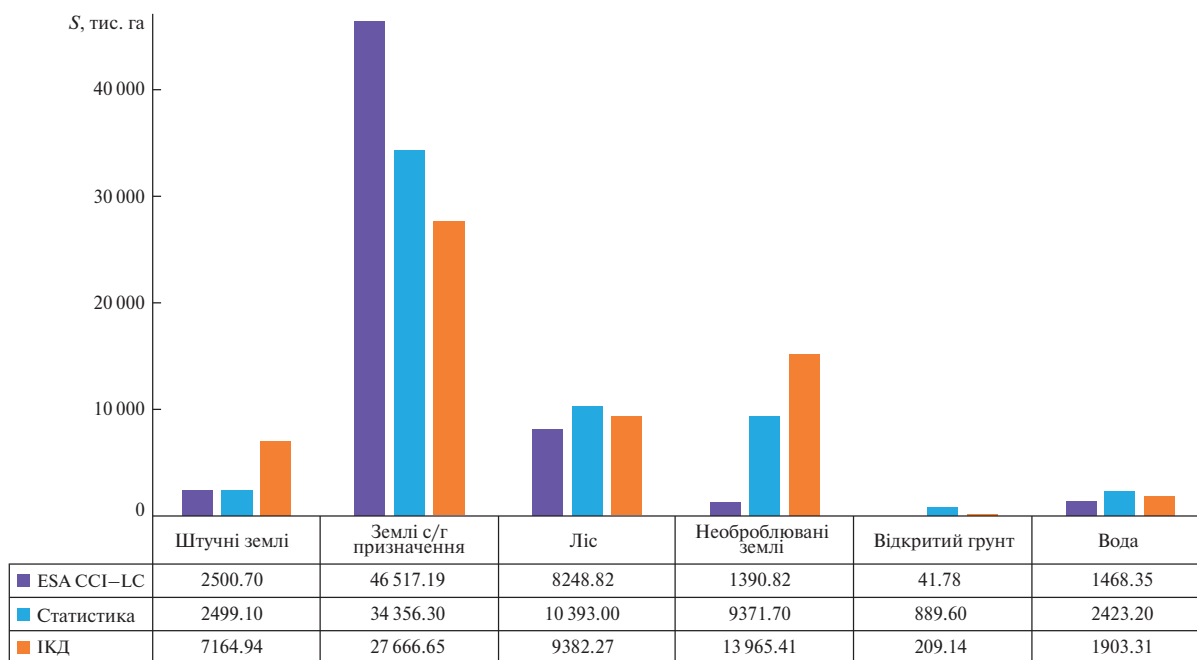


Рис. 4. Площі окремих видів земного покриву для території України у 2010 р. за глобальними та регіональними супутниковими даними (Інститут космічних досліджень), а також за даними офіційної статистики (тис. га)

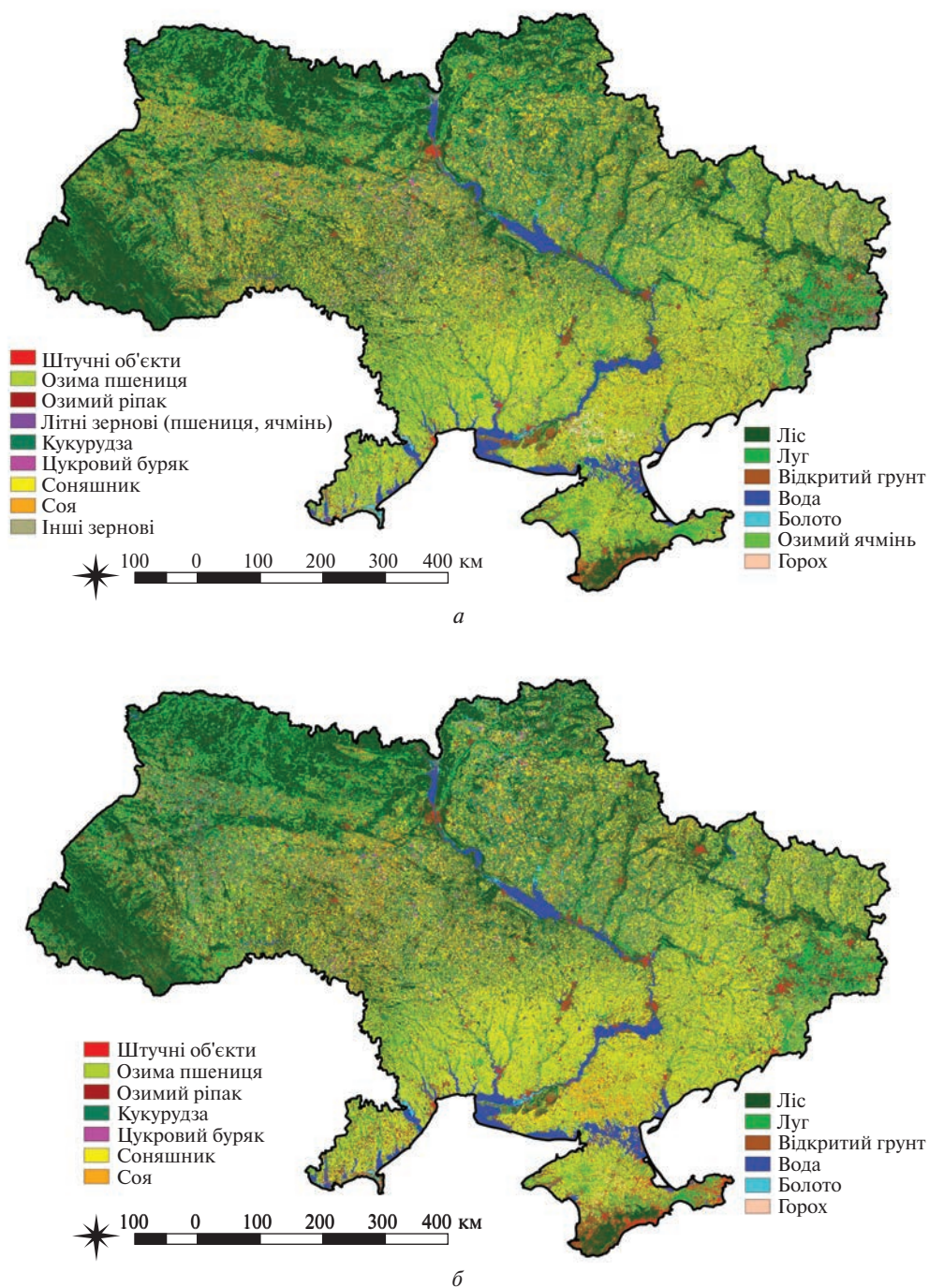


Рис. 5. Карти класифікації із 10-метровим розрізненням (у зменшеному масштабі) для території України у 2016 р. (а) та у 2017 р. (б)

мель, що обумовлено низьким просторовим розрізненням та неврахуванням специфіки сільськогосподарства України. Розбіжність площ штучних об'єктів між національними картами та офіційною статистикою можна пояснити тим, що у процесі побудови карт використовувалися маски населених пунктів (рис. 4).

Недостатня точність глобальних карт земного покриття зумовлює похибки оцінки його змін за період 2000—2010 рр. Національні історичні карти земного покриття з розрізненням 30 м дозволяють оцінити зміни земного покриття значно точніше.

Використання глобальних даних забезпечує гармонізацію та стандартизацію аналізу земного покриття і певний ступінь сумісності між країнами. Проте кожна країна повинна створювати власні карти земного покриття. Як правило, більш високе просторове розрізнення може забезпечити вищу точність, оскільки можна розрізнити менші об'єкти та їхні відмінності. Глобальна карта ніколи не буде кращою, ніж високоякісна національна карта. Національна карта створюється з використанням високоякісних вхідних даних (спутникові знімки або аерофотознімки), надійної методології, яка відповідає міжнародним стандартам і високому рівню контролю якості.

З використанням часових рядів даних «Сентінель» та розроблених методів глибинного навчання створено карти класифікації для всієї території України із просторовим розрізненням 10 м [15] (у зменшеному вигляді показані на рис. 5). Побудовані карти містять значно більше класів та мають загальну точність більше 80 %.

Побудовані карти для 2016 та 2017 років дають можливість здійснювати оцінку земного покриття на вищому рівні та досліджувати тенденцію

змін земного покриття у поєднанні із ретроспективними картами.

Кarti високого просторового розрізнення, побудовані із використанням великих об'ємів супутникових даних, дають можливість точніше оцінювати зміни землекористування, оскільки містять значно менше «змішаних» пікселів (такіх, в яких в одній точці продукту насправді може міститися суміш із різних типів землекористування) [15]. Порівняння відповідних площ для глобального та регіональних продуктів наведено у табл. 4.

Оцінка тенденцій деградації земель в поєднанні з аналізом їхніх рушійних сил є важливим кроком з точки зору розуміння нинішніх умов деградації земель, виявлення аномалій і деградованих районів. Така оцінка забезпечить наявність обґрунтованої бази даних для визначення змін земного покриття та прийняття рішень про можливі втручання і визначення пріоритетних напрямків роботи в областях з деградацією. Однак контекстуалізація і інтерпретація змін буде ключовим завданням національних і місцевих органів влади, які координують та здійснюють моніторинг для прийняття рішень.

Зміни в земному покритті можуть бути охарактеризовані як позитивні, так і негативні, при порівнянні з національною або місцевою інформацією. Деякі критичні переходи вважаються негативними (наприклад, ліси, чагарники, водноболотні угіддя на оброблюваній землі або у штучні об'єкти). Від класів земного покриття оброблюваних земель до штучних об'єктів (тобто урбанізація), а також від лісів до інших класів рослинного покриття (тобто вирубки).

Однак у виняткових обставинах дані показники можуть призвести до помилкових тверджень. Наприклад, заростання чагарниками та деревами

Таблиця 4. Приклад оцінки змін земного покриття для досліджуваної території

Значення	Переходи типів земного покриття	2000—2010 рр.		2000—2016 рр.
		ІКД, тис. га	ESA CCI-LC, тис. га	ІКД, тис. га
12	Ліс в необроблюваній землі	222.02	8.15	278.29
13	Ліс в оброблюваній землі	17.001	22.93	84.04
16	Ліс в голу землю	7.76	0.74	10.93

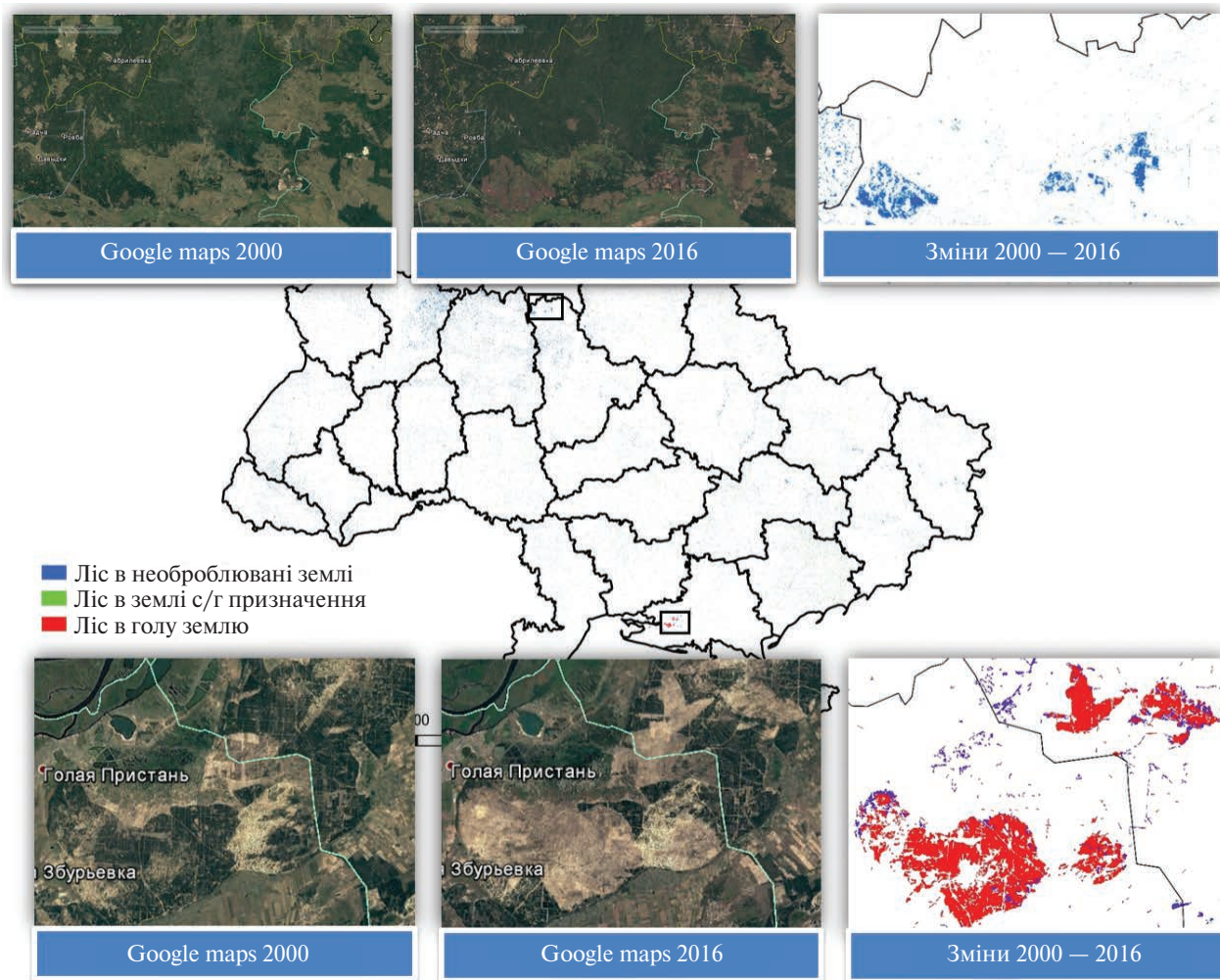


Рис. 6. Зміни земного покриття (2000–2016 роки)

(тобто зміна ґрунтового покриття від пасовищ до чагарників) у посушливих районах часто призводить до втрати природного капіталу із меншою кількістю рослин для випасу худоби і дикої природи. Такі зміни вважаються деградацією земель.

Як правило, проблемні області добре відомі національним міністерствам сільського господарства і дослідницьким центрам і можуть бути легко ідентифіковані на загальнодоступних серверах супутникових даних із високим просторовим розрізненням, таких як Google Earth. Використання карт земного покриття дає можливість ідентифікувати місця, де відбуваються зміни, та визначити їхню тенденцію, підрахувати площі та провести аналіз для прийняття рішень. Напри-

клад, використовуючи карти земного покриття 2016 та 2000 рр., можемо ідентифікувати основні проблеми на території України, місця, де відбуваються масштабні зміни земного покриття. Одна із найбільших територій в Україні, де відбувається опустелювання земель (перехід лісів у голу землю), розташована в Херсонській області (рис. 6).

Іншим прикладом є перехід лісів у необроблювані землі на півночі Київської області. Причин для такої деградації та змін може бути декілька, зміни клімату у бік потепління із кожним роком, господарська діяльність людей, пожежі та ін.

Якщо порівняти площі лісів, отримані на основі національних карт земного покриття, із статистикою за три роки (2000, 2010 та 2016 рр.), то

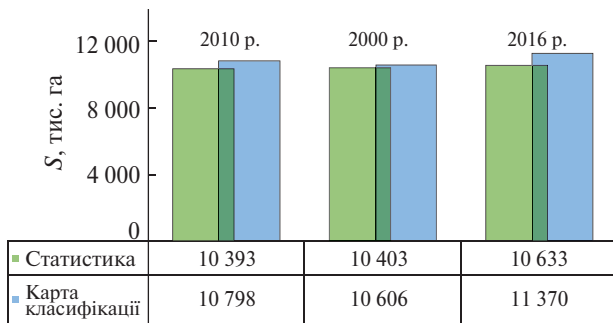


Рис. 7. Площа лісів по всій території України (тис. га)

видно, що площі, отримані на онові карт класифікації, систематично більші, особливо за 2016 р. (рис. 7). Це пояснюється тим, що на карті, окрім задекларованих лісів різного типу, є деревні насадження (лісосмуги, сади та ін.). У 2016 р. площа значно вища, ніж у попередні роки, можливими причинами цього є збільшення загальних запасів насаджень Державного агентства лісових ресурсів України (де спостерігається постійна динаміка зросту) [3], а також те, що карта в 2016 р. має просторове розрізнення 10 м, що дає можливість ідентифікувати всі дерева (у містах, селах і т. д.).

ВИСНОВКИ

Зміни земного покриття, що виникають протягом кількох десятиліть на території України, є результатом комплексної дії різномірних факторів. Не володіючи інформацією про тренди змін земного покриття, площі та регіони, в яких відбуваються зміни, неможливо прийняти правильні рішення на національному або регіональному рівні. Оскільки точність побудованої карти земного покриття впливає на виявлення змін земного покриття, важливою є обробка великих об'ємів супутникових даних із використанням високопродуктивних обчислень [14, 19, 22, 23] та відповідного математичного апарату. Використовуючи власну методологію класифікації земного покриття на основі даних високого просторового розрізнення супутників «Сентінель-1» та «Сентінель-2» створено карти земного покриття для всієї території України, які відкривають нові можливості для вирішення моніторингових задач при виявленні деградації земель [15, 17, 24,

32]. Розроблена технологія дає можливість створювати карти земного покриття із просторовим розрізненням 10 м кожного року, що є ключовим моментом в оцінці трендів змін земного покриття для території України.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Geonportal* ESA CCI Land Cover products: a new generation of satellite-derived global land cover products [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>.
2. *Geonportal* Геологічної служби США (United States Geological Survey) [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://earthexplorer.usgs.gov>.
3. Державне агентство лісових ресурсів України [Електронний ресурс] / Режим доступу : http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article;jsessionid=CDD57B4213360D89C901AC1D51FA9E94?art_id=101934&cat_id=32876.
4. Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я. Стан моніторингу фактичного використання сільськогосподарських земель в провідних країнах на основі супутникових даних // Укр. журн. дистанційного зондування Землі. — 2017. — № 12. — С. 59—66.
5. Atzberger C., Formaggio A., Shimabukuro Y., Udelhoven T., Mattiuzzi M., Sanchez G., Arai E. Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series // Int. J. Remote Sensing. — 2014. — **35**, N 7. — P. 2615—2638.
6. Bontemps S., Defourny P., Van E. Bogaert GLOBCOVER 2009-Products description and validation report // ESA. — 2010. — P. 1—30.
7. Chen J., Liao A., Cao X., et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens. — 2015. — **103**. — P. 7—27.
8. CORINE Land Cover. [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
9. Gallego F. J., Delincé J., Rueda C. Crop area estimates through remote sensing: stability of the regression correction // Int. J. Remote Sensing. — 1993. — **14**, N 18. — P. 3433—3445.
10. Giri A., Pengra B., Long J., Loveland T. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform. — 2013. — **25**. — P. 30—37.
11. Jia K., et al. Land cover classification using Landsat 8 operational land imager data in Beijing, China // Geocarto International. — 2014. — **29**, N 8. — P. 941—951.
12. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A.,

- Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting: A comparative analysis of results of regression and biophysical models // *J. Automation and Information Sci.* — 2013. — **45**, N 6. — P. 68–81.
13. Kolotii A., Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Yailymov B., Basarab R., Lavreniuk M., Oliynyk T., Ostapenko V. Comparison of biophysical and satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine // *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sci.* — 2015. — P. 39–44.
14. Kravchenko A., Kussul N., Lupian E., Savorsky V., Hluchy L., Shelestov A. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations // *Cybernetics and Systems Analysis.* — 2008. — **44**, N 4. — P. 616–624. — DOI:10.1007/s10559-008-9032-x.
15. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* — 2017. — **12**, N 5. — P. 778–782. — DOI: 10.1109/LGRS.2017.2681128.
16. Kussul N., Lavreniuk N., Shelestov A., Yailymov B., Butko I. Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique // *J. Automation and Information Sci.* — 2016. — **48**, N 5. — P. 42–54. — DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i5.40.
17. Kussul N., Lemoine G., Gallego J., Skakun S., Lavreniuk M., Shelestov A. Parcel-based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* — 2016. — **9**, N 6. — P. 2500–2508. — DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2560141.
18. Kussul N., Lemoine G., Gallego J., Skakun S., Lavreniuk M. Parcel based classification for agricultural mapping and monitoring using multi-temporal satellite image sequences // *The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International.* — 2015. — P. 165–168. — DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325725.
19. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Skakun S., Kussul O., Lavreniuk M. Geospatial intelligence and data fusion techniques for sustainable development problems // *11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, ICTERI 2015 (14–16 May 2015, Lviv, Ukraine).* — 2015. — P. 196–203.
20. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Yailymov B., Lavreniuk M., Kolotii A. High resolution land cover for Ukraine // *Space research in Ukraine.* - January 2016. — P. 44–47.
21. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Skakun S. Deep Learning Approach For Large Scale Land Cover Mapping Based On Remote Sensing Data Fusion // *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International* — 2016. — P. 198–201. — DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729043.
22. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects // *Grid and Cloud Database Management.* — 2011. — P. 279–305.
23. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O. High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring // *Int. J. Information Technologies & Knowledge.* — 2009. — **3**. — P. 135–156.
24. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The use of satellite SAR imagery to crop classification in Ukraine within JECAM project // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* — 2014. — P. 1497–1500.
25. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M., Yailymov B., Kussul O. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences.* — 2015. — P. 45–52.
26. Land Degradation Neutrality. [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www2.unccd.int/issues/land-sdgs/land-degradation-neutrality>.
27. Lavreniuk M., Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Yailymov B. Regional Retrospective High Resolution Land Cover For Ukraine: Methodology And Results // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015), N 15599383.* — P. 3965–3968. — DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326693.
28. Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A., Yailymov B., Yanchevskii S., Yashuk D., Kostetskiy A. Large-Scale Classification of Land Cover Using Retrospective Satellite Data // *Cybernetics and Systems Analysis.* — 2016. — **52**, N 1. — P. 127–138. — DOI: 10.1007/s10559-016-9807-4.
29. Malenovsky Z., Rott H., Cihlar J., Schaepman M., García-Santos G., Fernandes R., Berger M. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land // *Remote Sensing of Environment.* — 2012. — **120**. — P. 91–101.
30. Roy D., Wulder M., Loveland T., et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment.* — 2014. — **145**. — P. 154–172.
31. Shelestov A., Kolotii A., Camacho F., Skakun S., Kussul O., Lavreniuk M., Kostetsky O. Mapping of biophysical parameters based on high resolution EO imagery for JECAM test site in Ukraine // *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International* — P. 1733–1736.
32. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul O. Efficiency Assessment of Multitemporal C-Band Radarsat-2 Intensity and Landsat-8 Surface Reflectance Satellite Imagery for Crop Classification in Ukraine // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* — 2015. — DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2454297.

33. UNCCD. 2015. Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, held in Ankara from 12 to 23 October 2015. Part two: Actions. ICCD/COP(12)/20/Add.1. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn. See Decision3/COP.12, page 8. Available at: http://www.unccd.int/Lists/OfficialDocuments/cop12/20add_leng.pdf
34. Waldner F., Kussul N., Guerric le Maire, Dupuy S. Towards a set of agrosystem-specific cropland mapping methods to address the global cropland diversity // Int. J. Remote Sensing. — 2016. — **37**14, N 14. — P. 3196–3231. — DOI: 10.1080/01431161.2016.1194545.
35. Zhong L., Gong P., Biging G. Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using landsat imagery // Remote Sensing Environ. — 2014. — **140**. — P. 1–13.

Стаття надійшла до редакції 12.01.18

REFERENCES

1. Heoportel ESA CCI Land Cover products: a new generation of satellite-derived global land cover products [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu : <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>.
2. United States Geological Survey. [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu : <http://earthexplorer.usgs.gov>.
3. Derzhavne ahentstvo lisovykh resursiv Ukrainy [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu : http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?sessionId=CDD57B4213360D89C901AC1D51FA9E94?art_id=101934&cat_id=32876.
4. Shelestov A., Yailymov B. Stan monitorynhu faktychnoho vykorystannia sil'skohospodars'kykh zemel' v providnykh krainakh na osnovi suputnykovykh danykh. Ukrains'kyj zhurnal dystantsijnoho zonduvannia Zemli, 2017, N 12, P. 59–66. [in Ukrainian]
5. Atzberger C., Formaggio A., Shimabukuro Y., Udelhoven T., Mattiuzzi M., Sanchez G., Arai E. Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series. International Journal of Remote Sensing, 2014, Vol. 35, No. 7, P. 2615–2638.
6. Bontemps S., Defourny P., Van E. Bogaert GLOBCOVER 2009-Products description and validation report. ESA, 2010, P. 1–30.
7. Chen J., Liao A., Cao X., et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens, 2015, Vol. 103, P. 7–27.
8. CORINE Land Cover [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu: <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
9. Gallego F. J., Delincé J., Rueda C. Crop area estimates through remote sensing: stability of the regression correction. International Journal of Remote Sensing, 1993, Vol. 14, No.18, P. 3433–3445.
10. Giria C., Pengrab B., Longc J., Lovelanda T. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring, Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform, 2013, Vol. 25, P. 30–37.
11. Jia K., et al. Land cover classification using Landsat 8 operational land imager data in Beijing, China. Geocarto International, 2014, Vol. 29, No 8, P. 941–951.
12. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A., Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting: A comparative analysis of results of regression and biophysical models. Journal of Automation and Information Sciences, 2013, Vol. 45, No. 6, P. 68–81.
13. Kolotii A., Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Yailymov B., Basarab R., Lavreniuk M., Oliinyk T., Ostapenko V. Comparison of biophysical and satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2015, P. 39–44.
14. Kravchenko A., Kussul N., Lupian E., Savorsky V., Hluchy L., Shelestov A. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations. Cybernetics and Systems Analysis, 2008, Vol. 44, No. 4, P. 616–624. DOI:10.1007/s10559-008-9032-x.
15. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, Vol. 12, No. 5, P. 778–782. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2681128.
16. Kussul N., Lavreniuk N., Shelestov A., Yailymov B., Butko I. Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique, Journal of Automation and Information Sciences. 2016, Vol. 48, No. 5, P. 42–54. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i5.40.
17. Kussul N., Lemoine G., Gallego J., Skakun S., Lavreniuk M., and Shelestov A. Parcel-based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, Vol. 9, No 6, P. 2500 – 2508. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2560141.
18. Kussul N., Lemoine G., Gallego J., Skakun S., Lavreniuk M. Parcel based classification for agricultural mapping and monitoring using multi-temporal satellite image sequences. The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International, 2015, P. 165–168. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325725.
19. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Skakun S., Kussul O., Lavreniuk M. Geospatial intelligence and data fusion techniques for sustainable development problems. 11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, ICTERI 2015 (14–16 May 2015, Lviv, Ukraine), 2015, Vol.1356, P. 196–203.
20. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Yailymov B., Lavreniuk M., Kolotii A. High resolution land cover for Ukraine. Space research in Ukraine, January 2016, P. 44–47.

21. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Skakun S. Deep Learning Approach For Large Scale Land Cover Mapping Based On Remote Sensing Data Fusion. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International, 2016, P. 198–201. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729043.
22. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects. Grid and Cloud Database Management, 2011, P. 279–305.
23. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O. High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring. Int. J. Information Technologies & Knowledge, 2009, Vol. 3, P. 135–156.
24. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The use of satellite SAR imagery to crop classification in Ukraine within JECAM project, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014, P. 1497–1500.
25. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M., Yailymov B., Kussul O. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2015, P. 45–52.
26. Land Degradation Neutrality. [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu : <http://www2.unccd.int/issues/land-sdgs/land-degradation-neutrality>.
27. Lavreniuk M., Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Yailymov B. Regional Retrospective High Resolution Land Cover For Ukraine: Methodology And Results. International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015), № 15599383, P. 3965–3968. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326693.
28. Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A., Yailymov B., Yanchevskii S., Yaschuk D., Kosteckiy A. Large-Scale Classification of Land Cover Using Retrospective Satellite Data. Cybernetics and Systems Analysis, 2016, Vol 52, No 1, P. 127–138. DOI: 10.1007/s10559-016-9807-4.
29. Malenovsky Z., Rott H., Cihlar J., Schaepman M., García-Santos G., Fernandes R., Berger M. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. Remote Sensing of Environment, 2012, Vol. 120, P. 91–101.
30. Roy D., Wulder M., Loveland T., et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment, 2014, Vol. 145, P. 154–172.
31. Shelestov A., Kolotii A., Camacho F., Skakun S., Kussul O., Lavreniuk M., Kostetsky O. Mapping of biophysical parameters based on high resolution EO imagery for JECAM test site in Ukraine. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International, P. 1733–1736.
32. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul O. Efficiency Assessment of Multitemporal C-Band Radarsat-2 Intensity and Landsat-8 Surface Reflectance Satellite Imagery for Crop Classification in Ukraine. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2454297.
33. UNCCD. 2015. Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, held in Ankara from 12 to 23 October 2015. Part two: Actions. ICCD/COP(12)/20/Add.1. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn. See Decision3/COP.12, page 8. Available at: <http://www.unccd.int/Lists/OfficialDocuments/cop12/20add1eng.pdf>
34. Waldner F., Kussul N., Guerric le Maire, Dupuy S. Towards a set of agrosystem-specific cropland mapping methods to address the global cropland diversity. International Journal of Remote Sensing, July 2016, Vol. 3714, No 14, P. 3196–3231. DOI: 10.1080/01431161.2016.1194545.
35. Zhong L., Gong P., Biging G. Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using landsat imagery. Remote Sensing Environ, 2014, Vol. 140, P. 1–13.

Received 12.01.18

Б. Я. Яйлимов¹, Н. С. Лавренюк^{1,2}, А. Ю. Шелестов^{1,2},
А. В. Колотий^{1,2}, А. А. Яйлимова³, О. П. Федоров¹

¹ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев, Украина

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

³ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУЩЕСТВЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОГО ПОКРОВА

Проведены исследования и описаны методы определения индикаторов деградации земель. Исследования в рамках работы позволяют сформулировать методы получения количественных оценок землепользования и их изменений для территории Украины. Для оценки изменений земного покрова проведен анализ наличных источников данных для территории Украины. Рассмотрены наборы данных по территории Украины для создания карт земного покрова и методики оценки почвенно-растительного покрова, в частности для оценки степени деградации земель и обеспечения уровня LDN (Land Degradation Neutrality) при поддержке ООН. Для оценки динамики изменения земного покрова на территории Украины выбраны 2000, 2010 и 2016 гг. В качестве источников данных, использованы собственные карты, созданные по разработанной методологии, предусматривающей использование нейросетевой классификации

временных рядов спутниковых данных. Для 2000 и 2010 гг. карты земного покрова с пространственным разрешением 30 м для всей территории Украины созданы на основе снимков «Ландсат-4, -5, -7» в рамках проекта FP-7 SIGMA. Проведенный анализ показал, что общая точность глобальных карт земного покрова уступает региональным картам земного покрова на 10 % для 2000 и на 12 % для 2010. Для 2016 г. создана карта на основе спутниковых данных «Сентинель» с пространственным разрешением 10 м. С использованием созданных карт оценены изменения земного покрова для 2000—2010 и 2000—2016 гг. Оценка проводилась для таких типов земного покрова: лес — в необрабатываемые земли, лес — в обрабатываемые земли, лес — в голую землю. Идентифицированы основные проблемы на территории Украины, а именно места, где происходят масштабные изменения земного покрова. Также оценены значения площади для каждого из переходов. Сравнены площади лесов, полученные на основе национальных карт земного покрова за три года (2000, 2010 и 2016 гг.) со статистической информацией.

Ключевые слова: существенные переменные, карта земного покрова, спутниковые данные, деградация земель.

B. Ya. Yailymov¹, M. S. Lavreniuk^{1,2}, A. Yu. Shelestov^{1,2}, A. V. Kolotii^{1,2}, H. O. Yailymova³, O. P. Fedorov¹

¹ Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

³ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

METHODS OF ESSENTIAL VARIABLES DETERMINATION FOR THE EARTH'S SURFACE STATE ASSESSING

In this paper, we describe the results and the methodology for a definition of land degradation indicators. The con-

ducted work allowed us to specify the methods for obtaining quantitative estimates of land use as well as to estimate the land cover change for the territory of Ukraine over the period of time. An analysis of existing datasets for the territory of Ukraine was carried out to estimate the changes of the land cover. The sets of data over the territory of Ukraine were investigated for the creation of land cover maps as well as for methods of vegetation state assessment, in particular, for assessing land degradation and LDN (Land Degradation Neutrality) supported with the UN Convention to the Combat Desertification. As the national datasets for assessment of land cover changes dynamics, the land cover maps at the territory of Ukraine for 2000, 2010 and 2016 are considered. As the data sources, the maps developed at the Space Research Institute of Ukraine are used. These maps were created using the neural network classification of the time series of satellite data. For 2000 and 2010, the land cover maps have a spatial resolution of 30 m for the entire territory of Ukraine. They were created on the basis of the Landsat-4/5/7 satellite imagery within the framework of the SIGMA FP-7 project. The performed analysis showed that the overall accuracy of global land cover maps is lower as compare with the regional land cover maps by 10 % for 2000 and by 12 % for 2010. For 2016, the land cover map was created with the use of satellite data from the Sentinel constellation with a spatial resolution of 10 m. An analysis of land cover changes for 2000-2010 and 2000-2016 shows the following signs of land degradation (negative trends) at the territory of Ukraine: transitions of forest to the uncultivated land (non-cropland), transitions of forest to the cultivated land (cropland), transitions of forest to the bare land. The main problems of land degradation in Ukraine were identified, namely the places where significant land cover changes took place. The analysis of land cover change areas over the specified period of time was performed for each type of transition. We present also the results of a cross-comparison of forest areas obtained from the national land cover maps with statistics for three years (2000, 2010 and 2016).

Keywords: essential variables, land cover map, satellite data, land degradation.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.038>

УДК 621.791:629.78

**Л. М. Лобанов, Ю. А. Асніс, Є. Г. Терновий,
В. Ф. Шулим, О. Р. Булацев, В. А. Крюков, Т. О. Лікаренко**

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
Національної академії наук України, Київ, Україна

ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОРБІТАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА РЕМОНТУ ТРУБОПРОВОДІВ В КОСМОСІ

На станціях, які функціонують в космічних умовах, використовують велику кількість трубопроводів, виготовлених із різних корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, титанові сплави тощо). Вони розташовані як усередині станцій, так і за її бортом. У процесі тривалої експлуатації станцій трубопроводи з різних причин (корозія, механічні пошкодження тощо) можуть виходити з ладу і потребують ремонту в умовах космосу. Дослідженнями, проведеними в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, встановлено, що надійним і перспективним технологічним процесом для ремонту трубопроводів в космічних умовах є зварювання. Метою даної роботи є розробка спеціалізованого обладнання і технологій для зварювання і ремонту трубопроводів усередині та зовні космічних пілотованих станцій. Для проведення досліджень зі зварювання трубчастих з'єднань було створено лабораторне обладнання та розроблено технології зварювання і ремонту неповоротних трубопроводів у космічних умовах. Для цього було відпрацьовано технології орбітального зварювання труб з нержавіючих сталей та титанових сплавів аргонно-дуговим та електронно-променевим способами. Розроблено режими зварювання (зварювальний струм, напруга на дузі та прискорена напруга електронного пучка, швидкості зварювання). Визначено попередні режими орбітального проплавлення суцільних трубчастих зразків і режими зварювання неповоротних стикових з'єднань одно- та багатопрохідними швами. При першому проході зварювання виконували з наскрізним проплавленням для формування кореневого валика, а повторні проходи по першому і наступному швах виконували як наплавочні з заключним формуванням верхнього валика і поступовим виводом кратера. Вивчено механічні властивості одержаних зварних з'єднань при кімнатних та низьких температурах і їхній хімічний склад. Досліджено макро-і мікроструктуру та твердість одержаних зварних з'єднань. Проведено випробування на стійкість зварних з'єднань до міжкристалітної корозії. Випробування на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань нержавіючих і титанових сплавів при температурах випробувань +20 °C та -196 °C показали, що зварювання орбітальними аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати з'єднання, близькі за міцністю до основного металу. Проведені дослідження на хімічну неоднорідність показали, що зварні з'єднання, одержані аргонно-дуговим та електронно-променевим способами, рівнозначні за хімічним складом до основного металу. Вивчення макро- і мікроструктур, геометрії і твердості з'єднань із нержавіючих і титанових сплавів, одержаних орбітальними способами, показали задовільну та стабільну якість цих з'єднань. Випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, які були одержані орбітальними способами аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання. Вперше розроблено та виготовлено дослідні зразки обладнання та принципові технології орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання усередині та зовні функціонуючої космічної станції. Проведено випробування виготовленого обладнання, на якому одержали орбітальними способами зварювання дослідні зразки стикових трубчастих з'єднань для механічних і фізико-хімічних досліджень. Результати механічних і фізико-хімічних досліджень показали, що орбітальне зварювання аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати якісні зварні з'єднання, близькі за міцністю і хімічним складом до основного металу.

© Л. М. ЛОБАНОВ, Ю. А. АСНІС, Є. Г. ТЕРНОВИЙ, В. Ф. ШУЛИМ,
О. Р. БУЛАЦЕВ, В. А. КРЮКОВ, Т. О. ЛІКАРЕНКО, 2018

Ключові слова: космічні станції, трубопроводи, неповоротні стики, аргонно-дугове зварювання, електронно-променеве зварювання, нержавіючі сталі, титанові сплави, трубчасті з'єднання, мікрокамера, електронно-променевий нагрівач, режими зварювання, автоопресування, зовнішні дефекти, внутрішні дефекти, механічні властивості, хімічний склад, макро- і мікроструктура, мікротвердість, міжкристалінна корозія.

На пілотованих космічних станціях використовують велику кількість трубопроводів діаметрами 8...20 мм з товщиною стінки 0.5...1.5 мм, виготовлених із різних корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, титанові сплави тощо). Вони розташовані як усередині станції, так і за її бортом. У процесі тривалої експлуатації станцій трубопроводи з різних причин (корозія, механічні пошкодження тощо) можуть виходити з ладу і потребують ремонту в умовах космосу. Надійним і перспективним технологічним процесом у таких випадках є зварювання.

Дослідженнями, проведеними в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, встановлено, що найкращими способами ремонту трубопроводів, розташованих усередині космічного модуля, є зварювання в накидних камерах з контрольованою захисною атмосферою аргону або гелію [8, 10], а для ремонту трубопроводів, розташованих зовні станції, — електронно-променеве зварювання [6, 7, 9].

Незважаючи на наявність обладнання досить широкої номенклатури для орбітального зварювання в земних умовах [1—5] такого обладнання для космічних умов немає.

Метою даної роботи є розробка спеціалізованого обладнання і технологій для зварювання і ремонту трубопроводів усередині та зовні космічних пілотованих станцій.

У процесі проведення експериментів з орбітального аргонно-дугового зварювання застосовували лабораторну установку з інверторним джерелом живлення GYSMI-160 (рис. 1). Для електронно-променевих зварювань був створений спеціалізований лабораторний енергокомплекс з електронно-променевим нагрівачем, який мав можливість обертатися навколо неповоротної труби. За зразки використовували трубки із сталей 12X18H10T, 304SS та титанових сплавів BT1-0 та ПТ-3В діаметрами 10.0, 12.8, 16.3 мм і товщиною стінки 1.0...1.5 мм, які зварювали встик без присадкових матеріалів.

Орбітальне аргонно-дугове зварювання з'єднань трубчастих зразків із сталі 12X18H10T і титанового сплаву BT1-0 виконували одним та багатопрохідними швами. А при електронно-променевому зварюванні застосовували одно- та двопрхідне орбітальне зварювання зразків із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В. Для вказаних способів визначали оптимальні режими зварювання.

При відпрацьовуванні режимів зварювання оцінку якості одержаних стикових з'єднань контролювали візуальним оглядом верхнього та зворотного (кореневого) валиків шва на наявність зовнішніх дефектів, показниками механічних та хімічних властивостей, а також по макро-мікрошліфах за допомогою мікроскопа МБС-9 здійснювали контроль геометрії з'єднань, глибини провару, та наявності внутрішніх дефектів. При цьому основними критеріями візуальної якості зварних трубчастих з'єднань вважаються: наявність підсилення верхнього та кореневого валиків шва, поступовий вивід кратера, відсутність раковин та бокових підрізів швів. При вивченні макро-мікроструктур якості з'єднання оцінювалася по наявності пор, тріщин та неметалевих включень у металі шва і в зоні термічного впливу, твердість з'єднання та його корозійна стійкість.

Хімічний склад основного металу і металу швів визначали мікрорентгеноспектральним аналізом на мікроаналізаторі SX-50 фірми «Самеса». Міцність розриву трубчастих з'єднань, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, визначали шляхом механічних випробувань зразків на розривній машині ЦДМ-10 при температурі +20 °С, а для з'єднань, виконаних електронно-променевим зварюванням, і при температурі –196 °С. Для металографічних досліджень використовували оптичний мікроскоп «Neophot 32». Бал зерен вимірювали шляхом візуального порівняння з еталонами шкал.

Мікротвердість з'єднань визначали на поздовжніх мікрошліфах мікротвердоміром М-400 фірми LECO з кроком 0.3 мм.

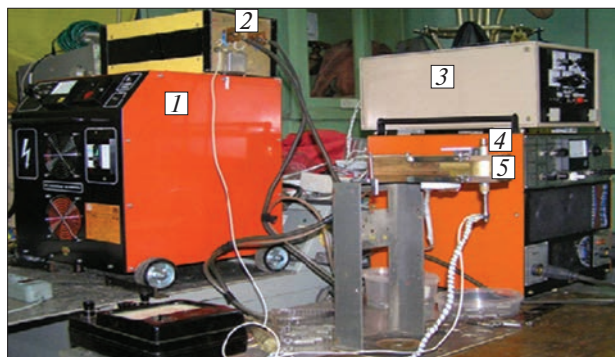


Рис. 1. Лабораторна установка для наземного відпрацювання технології орбітального аргонно-дугового зварювання трубопроводів усередині космічної станції: 1 — джерело живлення GYSMI-160, 2 — високочастотний підпалювач дуги, 3 — програматор режимів зварювання, 4 — система керування процесом зварювання, 5 — орбітальний пристрій

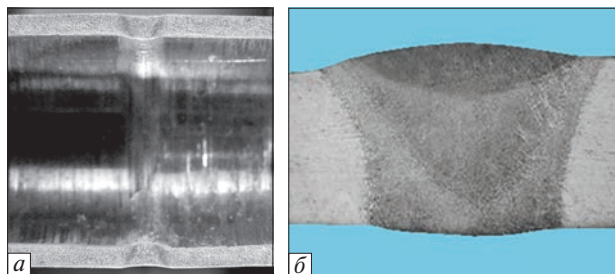


Рис. 2. Макрошліфи стикових з'єднань труб діаметром 10 мм та товщиною 1.0 мм із сталі 12X18H10T, одержаних аргонно-дуговим зварюванням способом автоопресування: а — за один прохід, б — за два проходи з виводом кратера

Схильність трубчастих з'єднань на стійкість до міжкристалітної корозії (МКК) визначали згідно з ДСТУ EN ISO 3651-2: за методом А для

зразків із сталі 12X18H10T і за методом Б для титанового сплаву ПТ-3В, одержаних аргонно-дуговим та електронно-променевим зварюванням. Оцінку результатів випробувань на стійкість до МКК виконували металографічним методом за допомогою мікроскопа «Neophot 21». Для цього виготовляли шліфи, які протравлювали електрохімічним способом в 10 % розчині щавелевої кислоти до слабого виявлення границь зерен. Густина струму під час травлення становила $(1.0 \pm 0.2) \times 10^4 \text{ А/м}^2$.

Дослідження зі зварювання виконували в два етапи. На першому проводили експерименти з орбітального аргонно-дугового зварювання способом автоопресування [3, 4]. Для визначення попередніх режимів зварювання спочатку одержували проплави суцільних трубчастих зразків, а після цього зварювали неповоротні стикові з'єднання одно- та багатопрхідними швами. При першому проході зварювання виконували з наскрізним проплавленням для формування кореневого валика (рис. 2, а), а повторні проходи по першому і наступному швах — як наплавочні з заключним формуванням верхнього валика і поступовим виведенням кратера (рис. 2, б).

Після проведених робіт визначали параметри наскрізних і повторних проплавів на суцільних трубках, а також режими зварювання неповоротних стикових з'єднань із сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0. Режими аргонно-дугового зварювання стикових трубчастих з'єднань наведено у табл. 1. Різні значення струму дуги для кожного проходу при зварюванні трубок пояснюються тим, що при зварюванні способом автоопресу-

Таблиця 1. Режими зварювання стикових трубчастих з'єднань, одержаних аргонно-дуговим способом з наскрізним першим проходом та трьома повторними проходками

Номер зразка	Діаметр, товщина, мм	Матеріал	Струм дуги, А		Напруга дуги, В	Швидкість зварювання, м/год
			І _{д1}	І _{д2-4}		
10	10.0 × 1.0	12X18H10T	26	15...18	10	15
13	12.8 × 1.2	12X18H10T	30	15...18	11	15
20	16.3 × 1.5	12X18H10T	30	20...18	11	15
40	10.0 × 1.0	ВТ1-0	31	18...17	11	8

вання для одержання верхнього підсилення валика шва кожний наступний шов повинен виконуватися як наплавочний, без перекриття глибини проплавлення попереднього шва. При цьому у шві виникають напруження скорочення, які формують підсилений верхній валик. Різні швидкості зварювання для сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0 обумовлені тим, що титановий сплав ВТ1-0 — тугоплавкий метал, для зварювання якого потрібна більша погонна енергія, ніж при зварюванні сталі 12X18H10T.

Перший етап завершено експериментами з відпрацювання попередньої технології орбітального аргонно-дугового зварювання стиків труб для ремонту трубопроводів у космічних умовах. Для цього виготовили дослідний зразок мікрокамери орбітального аргонно-дугового зварювання стиків труб (рис. 3, а). На пристрої відпрацьовано принципову технологію орбітального аргонно-дугового зварювання неповоротних стиків труб із сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0 діаметром 10 мм з товщиною стінки 1 мм. Стовкові з'єднання одержували за два проходи: один основний прохід з посиленням коренем шва, а другий опресувальний — з виводом кратера для одержання підсилення верхньої частини валика.

На другому етапі виконували орбітальне електронно-променеве зварювання розробленим прямонакальним нагрівачем (рис. 3, б). При цьому для проведення експериментів використовували зразки труб діаметром 12.8 мм із нержавіючої сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В. В ході відпрацювання технології виконували проплави на суцільних зразках, а потім — стикові з'єднання труб.

В результаті проведених експериментів розроблено попередню технологію електронно-про-

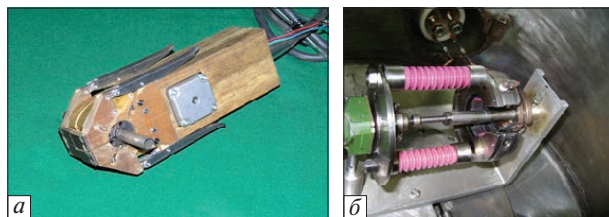


Рис. 3. Дослідний зразок мікрокамери для орбітального аргонно-дугового зварювання трубопроводів, розташованих усередині космічної станції (а), та електронно-променевий нагрівач для орбітального зварювання труб зовні космічної станції (б)



Рис. 4. Характер зміни технологічних параметрів зварювального циклу при орбітальному електронно-променевому зварюванні труб: I — «гарячий старт», $t_1 = 0...5$ с; II — час зварювання, $t_2 = 30$ с; III — виведення кратера, $t_3 = 0...5$ с

меневого орбітального зварювання трубчастих з'єднань із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В при потужності пучка до 400 Вт і прискорювальній напрузі 10 кВ. Режими зварювання наведено в табл. 2. При виконанні експериментальних проплавлень орбітальним електронним пучком було встановлено, що для забезпечення формування зварного шва суттєво впливають значення і характер немонотонної зміни технологічних параметрів на початку зварювального процесу (який називають «гарячий старт»), а також при його завершенні (виведення кратера).

Таблиця 2. Режими зварювання стикових трубчастих з'єднань, одержаних орбітальним електронно-променевим зварюванням труб $\varnothing 12.8 \times 1.0$ мм за два проходи

Номер зразка	Матеріал	$I_{\text{пуч.}}, \text{ мА}$	$U, \text{ кВ}$	$V_{\text{зв.}}, \text{ м/год}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$
19	304SS	35	9.2	22	0.5	14	3
2	ПТ-3В	32.5	9.5	36	1.5	8	3.5

Примітка: t_1, t_2, t_3 — проміжки часу зварювального циклу.

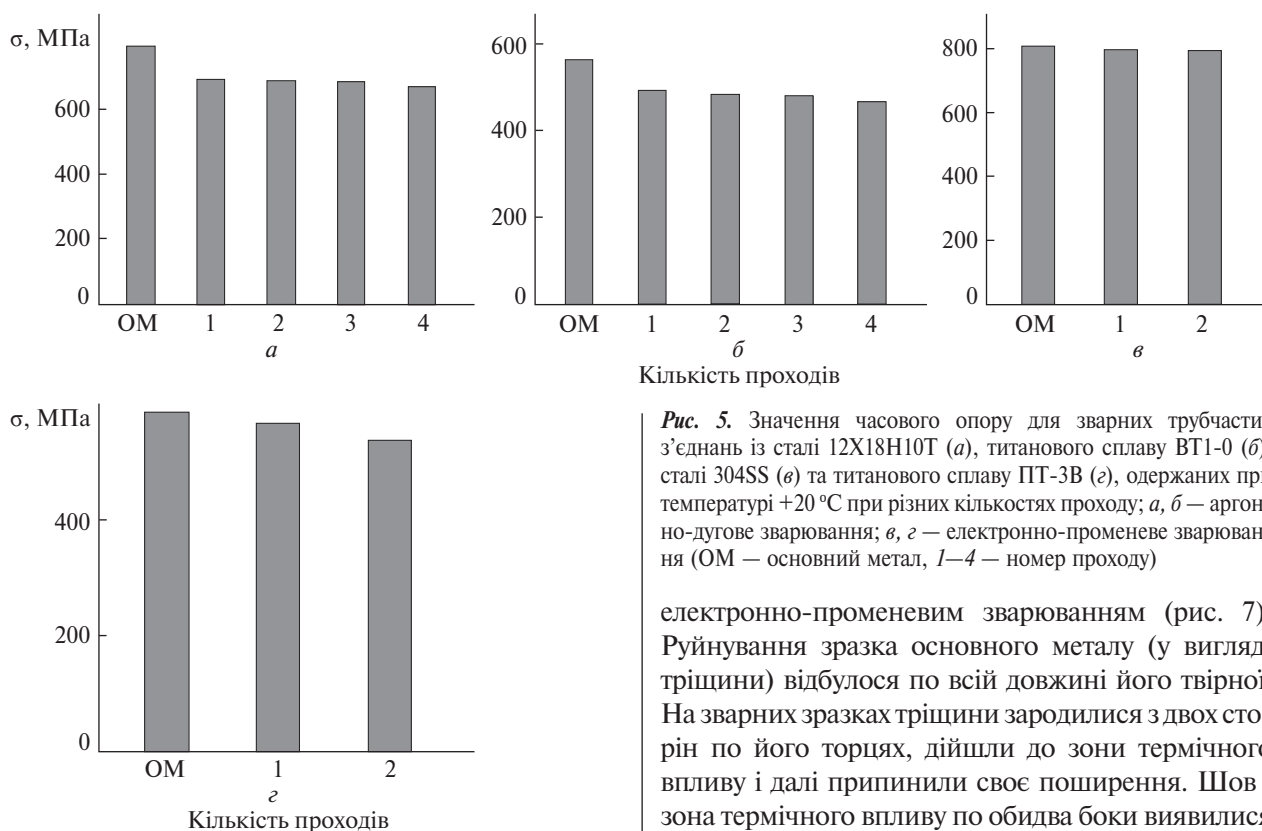


Рис. 5. Значення часового опору для зварних трубчастих з'єднань із сталі 12Х18Н10Т (а), титанового сплаву ВТ1-0 (б), сталі 304SS (в) та титанового сплаву ПТ-3В (г), одержаних при температурі +20 °С при різних кількостях проходу; а, б — аргонно-дугове зварювання; в, г — електронно-променеве зварювання (ОМ — основний метал, 1–4 — номер проходу)

електронно-променевим зварюванням (рис. 7). Руйнування зразка основного металу (у вигляді тріщини) відбулося по всій довжині його твірної. На зварних зразках тріщини зародилися з двох сторін по його торцях, дійшли до зони термічного впливу і далі припинили своє поширення. Шов і зона термічного впливу по обидва боки виявилися настільки пластичними, що спрацювали як гасники тріщин. Це можна пояснити тим, що зона термічного впливу при зварюванні вказаним способом є більш пластична порівняно з основним металом труби, яка не зазнавала термічної обробки.

Дослідження хімічної неоднорідності за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу показало рівномірний розподіл легуючих елементів у зварних з'єднаннях.

Вивчено мікроструктури з'єднань, одержаних способами аргонно-дугового та електронно-променевого зварювання (рис. 8, 9).

Результати металографічних досліджень корелюють з результатами випробувань на часовий опір розривом. Шви, виконані способами аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання за два проходи, більш щільні та якісні, порівняно з однопрохідними, та мають менше неметалевих включень.

Для аргонно-дугового зварювання стикових з'єднань із сталі 12Х18Н10Т бал зерна у металі шва дорівнює 6, у навколошовній зоні — 4–5, в центрі зони термічного впливу біля зони рекристалізації — 5–6, а на кордоні з основним металом — 4–5.

Циклограма процесу має вигляд, представлений на рис. 4.

Проведені випробування механічних властивостей зварних трубчастих з'єднань при температурі +20 °С показані на гістограмах рис. 5, а при температурах –196 °С — на рис. 6.

В результаті випробувань на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань Ø10×1.0мм із сталі 12Х18Н10Т і титанового сплаву ВТ1-0 в умовах температури +20°С, виконаних аргонно-дуговим зварюванням за два проходи, встановлено, що він дорівнює 0.80...0.84σ_в основного металу, а зразків із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням також за два проходи, — 0.87...0.9σ_в основного металу. Дані випробувань при температурах –196 °С трубчастих зразків із сталі 304SS та сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням, показали коефіцієнт міцності 0.9...0.95σ_в основного металу.

Проведено випробування на сплющення трубчастих з'єднань із сплаву ПТ-3В, одержаних

Рис. 6. Значення часового опору на розрив при температурі випробувань -196°C трубчастих з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням: *a* — сталь 304SS, *б* — титановий сплав ПТ-3В (1 — основний метал, 2 — зварні з'єднання)

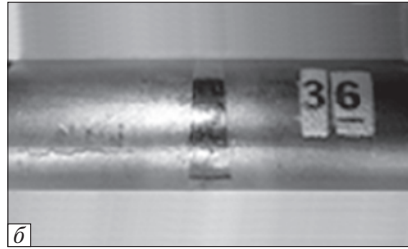
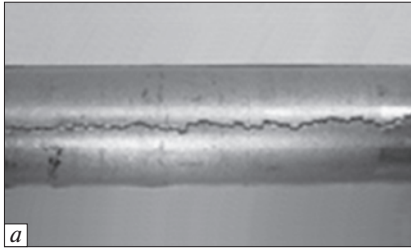
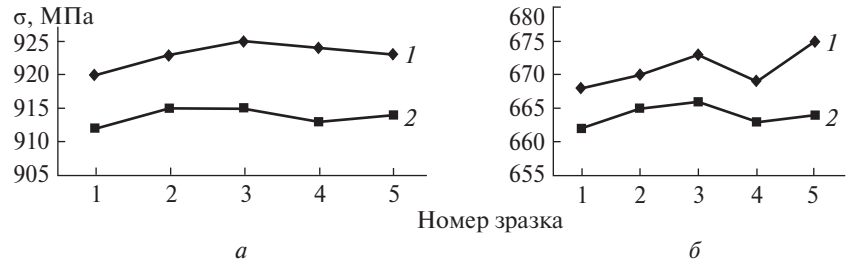


Рис. 7. Зразки зварних трубчастих з'єднань із титанового сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням, після випробувань на сплющення: *a* — основний метал; *б* — зварювання двома проходами і з наскрізним проваром по всьому внутрішньому периметру

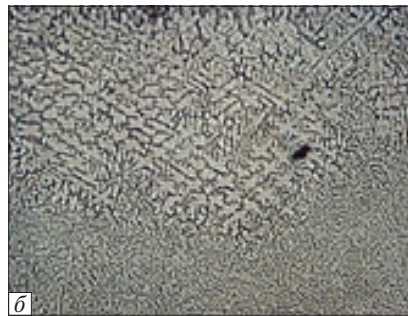


Рис. 8. Мікроструктури трубчастих стикових з'єднань із сталі 12X18H10T (*а, б, в*) та сплаву ВТ1-0 (*г, д, е*), одержаних аргонно-дуговим зварюванням: *а, г* — центральні ділянки металу шва; *б, д* — ділянки швів другого проходу; *в* — ділянка кордону лінії сплавлення та зони термічного впливу, *е* — ділянка зони термічного впливу і основного металу

У випадку електронно-променевого зварювання з'єднань зі сталі 304SS показники більш якісні, ніж сталі 12X18H10T: в центрі шва бал зерна сягає 6—7, в зоні термічного впливу біля лінії сплавлення — 6, на ділянці дрібного зерна — 7—8. Лита мікроструктура шва

(рис. 10, *а*) має двофазну систему (аустеніт та δ -ферит). Склад δ -фериту у металі шва дорівнює 1...1.5 %. Мікроструктура зони термічного впливу однакова з обох боків шва, що свідчить про рівномірний нагрів цієї зони при зварюванні.

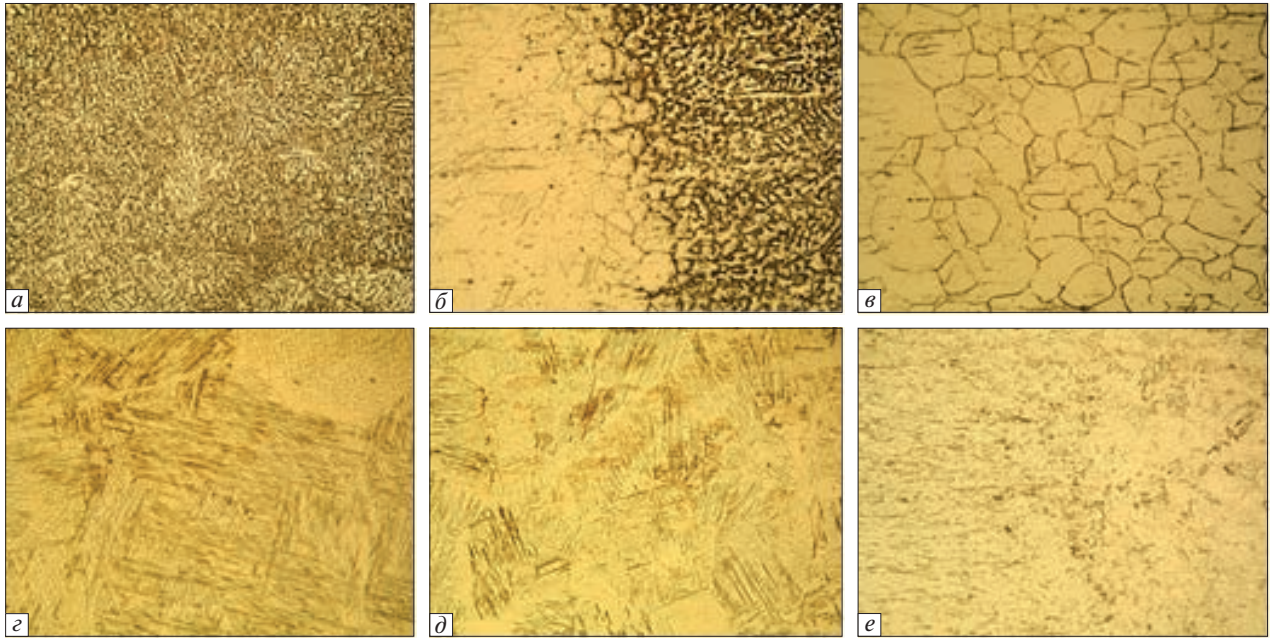


Рис. 9. Мікроструктури трубчастих стикових з'єднань із сталі 304SS (а, б, в) та сплаву ПТ-3В(г, д, е), одержаних електронно-променевим зварюванням: а, г — центральні ділянки металу шва; б, д — ділянки кордону лінії сплавлення і зони термічного впливу; в, е — ділянки кордону зони термічного впливу і основного металу

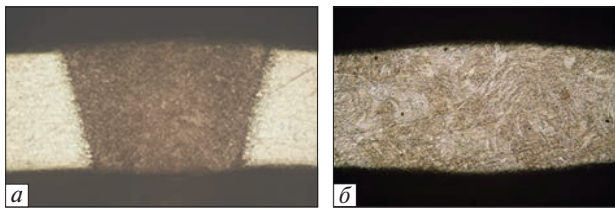


Рис. 10. Мікроструктури поперечного перетину з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням труб за два проходи: із сталі 304SS (а) та титанового сплаву ПТ-3В (б)

На рис. 10, б наведено мікроструктуру загального виду стикового з'єднання із титанового сплаву ПТ-3В, одержаного електронно-променевим зварюванням за два проходи. Структура металу шва також лита, однорідна, дрібно-дисперсна і має голчато-пластинчасту α -фазу. У металі шва не виявлено структури двійників, на відміну від швів з одним проходом. Структура складається із великих зерен α -фази (бал зерна 1, рис. 9, г), дефектів у швах не зафіксовано. Зона термічного впливу має зерна α -фази різного розміру: на ділянці великого зерна — бал 3, на ділянці дрібного зерна — бал 6 (рис. 9, д), на ділянці неповної перекристалізації — бал 7 (рис. 9, е).

Значення мікротвердості з'єднань із сталі 12Х18Н10Т, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, для металу шва і зони термічного впливу різні та залежать від кількості зварювальних проходів. Шов з одним проходом має максимальну твердість до 2750 МПа в центрі, а мінімальну — до 1850 МПа — у зоні термічного впливу. Після другого проходу характер розподілу твердості більш рівномірний, але значення твердості дещо нижчі. У центрі шва максимальна твердість сягає 2600 МПа, а мінімальна — в зоні рекристалізації — 1750 МПа.

Після третього та четвертого проходів твердість стає більш стабільною, але ще нижчою, і по всьому перетину шва вона становить 2500 МПа. Значення твердості у з'єднаннях сплаву ВТ1-0, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, також залежать від кількості проходів. Відносно стабільними і достатньо високими значення твердості стають після другого проходу.

Розподіл мікротвердості з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням, визначали за тією ж методикою, що і з'єднань, виконаних аргонно-дуговим зварюванням. Дані щодо мікротвердості для

металу шва і зони термічного впливу сталі 304SS мають також різний характер і показники, в залежності від кількості зварювальних проходів.

Шов з одним проходом має максимальну твердість в центрі шва до 2350 МПа (2750 МПа для аргонно-дугового зварювання), а мінімальну — в зоні рекристалізації — до 2320 МПа (1850 МПа для аргонно-дугового зварювання) при твердості основного металу 3060 МПа. Після другого проходу характер розподілу твердості дещо стабілізувався, але значення твердості знизилися. Для титанового сплаву ПТ-3В ці показники мають такі ж тенденції, при цьому зона термічного впливу і шов виявилися настільки пластичними, що затримали поширення тріщин при випробуваннях на сплюснення.

Проведені випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, виконані за допомогою орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання. Після випробувань на мікрошліфах виявлено, що границі металу шва і основного металу мають різномірну структуру, а це свідчить про те, що МКК не виявлено.

ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено дослідні зразки обладнання та принципові технології орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання усередині та зовні пілотованої космічної станції.

2. Встановлено, що в дослідженому діапазоні параметрів оптимальні режими зварювання відповідають такій швидкості, при якій на вибраній потужності стабільно формується як кореневий валик підсилення, так і верхній валик. З огляду на геометрію зварних швів такі режими дозволяють одержати якісні зварні з'єднання.

3. Одержані результати випробувань на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань нержавіючих та титанових сплавів при температурах випробувань +20 °C та -196 °C показали, що зварювання аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати з'єднання, близькі за міцністю до основного металу.

4. Розроблено проектно-конструкторську документацію та виготовлено дослідний зразок мі-

крокамери для орбітального аргонно-дугового зварювання неплавким вольфрамовим електро-дом у контрольованій атмосфері інертних газів. Виготовлено дослідний зразок нагрівача для орбітального електронно-променевого зварювання труб малих діаметрів.

5. Проведені випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, виконані за допомогою орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. с. SU 1299375 A1, МКИ 6H01J 1/20. Электронный кольцевой нагреватель / Коновалов А. И., Никонов А. В. — Опубл. 10. 11. 95. — Бюл. № 31.
2. Боровик В. М., Шубин Ф. В., Фролов О. В. ЭЛС неповоротных стыков трубчатых изделий // Всесоюз. научно-техн. конф. «Прогрессивные процессы сварки в машиностроении»: Тез. докл., 25 — 30 мая 1991. — Красноярск, 1991. — С. 123—124.
3. Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Технология автоматической дуговой сварки трубных соединений и перспективы ее совершенствования // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технике. — 1985. — Вып. 1. — С. 52—63.
4. Гриненко В. И., Белкин С. А., Астафурова Н. И. Сварка неповоротных стыков труб из стали 1X18H9T методом автоопрессовки // Сварочное производство. — 1993. — № 10. — С. 27—29.
5. Ильинский А. М. Особенности разработки оборудования для сварки полым термоэмиссионным катодом в невесомости // Изб. тр. Юбилейный сборник «Ракетно-космические технологии». — М.: Техномаш, 2003. — С. 17—23.
6. КОСМОС: технологии, материаловедение, конструкции: сбор. научн. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 + 24 с. вкл.
7. Патон Б. Е. Космические технологии на рубеже третьего тысячелетия // Автомат. сварка. — 2000. — № 4. — С. 3—5.
8. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Бернадский В. Н. и др. Применение сварки для ремонта космических объектов // Космич. исслед. на Украине. — 1976. — Вып. 9. — С. 3—5.
9. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 182 с.
10. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф., Стесин В. В. и др. Некоторые принципы конструирования оборудования для технологических работ в космосе // Технология в космосе: Тем. сб. докл. IV гагаринских чтений. — М., 1977. — С. 16—23.

Стаття надійшла до редакції 12.03.18

REFERENCES

1. A. s. SU 1299375 A1, MKI 6H01J 1/20. Elektronnyy koltsevoy nagrevatel. Kononov A. I., Nikonov A. V. — Opubl. 10.11.95. Byul. N 31.
2. Borovik V. M., Shubin F. V., Frolov O. V. ELS nepovorotnykh stykov trubchatykh izdeliy // Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Progressivnye protsessy svarki v mashinostroenii” 25 — 30 maya 1991: Tezisy dokladov — Krasnoyarsk, P. 123—124 (1991).
3. Bukarov V. A., Ishchenko Yu. S. Tekhnologiya avtomaticheskoy dugovoy svarki trubnykh soedineniy i perspektivy ee sovershenstvovaniya // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Svarka v yadernoy tekhnike, vyp. 1, M.: TsNIIAtomInform. P. 52—63 (1985).
4. Grinenko V. I., Belkin C. A., Astafurova N. I. Svarka nepovorotnykh stykov trub iz stali 1Kh18N9T metodom avtoopressovki. *Svarochnoe proizvodstvo*, N 10, p. 27—29 (1993).
5. Ilinskiy A. M. Osobennosti razrabotki oborudovaniya dlya svarki polym termoemissionnym katodom v nevesomosti. Izbrannye trudy. Yubileyny sbornik “Raketno-kosmicheskie tekhnologii”. Moskva, “Tekhnomash”. P. 17—23. (2003).
6. SPACE: Tekhnologii, materialovedenie, konstruktzii: sbor. nauch. trud / Pod red. B. E. Patona, 528 p. (IES im. E. O. Patona NAN Ukrainy, Kiev, 2000) [in Russian].
7. Paton B. E. Kosmicheskie tekhnologii na rubege tretogo tysyacheletiya. *Avtomaticheskaya svarka*, N 4, p. 3—5 (2000).
8. Paton B. E., Dudko D. A., Bernadskii V. N. Primenenie svarki dlya remonta kosmicheskikh obektov. Kosmicheskie issledovaniya na Ukraine. Kiev, Naikova dumka, Vp. 9, p. 3—5 (1976).
9. Paton B. E., Lapchinsky V. F. Svarka i rodstvennye tekhnologii v kosmose, 182 p. (Naukova dumka, Kiev, 1998).
10. Paton B. E., Lapchinsky V. F., Stesin V. V. Nekotorye printsipy konstruirovaniya oborudovaniya dlya tekhnologicheskikh rabot v kosmose. Tekhnologiya v kosmose: Tem. Sbornik doklad. IV gagarinskikh chteniy. M., p. 16—23 (1977).

Received 12.03.18

Л. М. Лобанов, Е. А. Аснис, Е. Г. Терновой,
В. Ф. Шулим, А. Р. Булацев, В. А. Крюков, Т. А. Лікаренко

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ И РЕМОНТА ТРУБОПРОВОДОВ В КОСМОСЕ

На станциях, которые функционируют в космических условиях, используют большое количество трубопроводов, изготовленных из различных коррозионностойких материалов (нержавеющая сталь, титановые сплавы и

др.). Они расположены как внутри станции, так и за ее бортом. В процессе длительной эксплуатации станций трубопроводы по различным причинам (коррозия, механические повреждения и др.) могут приходить в негодность и требуют ремонта в космических условиях. Исследованиями, проведенными в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, установлено, что надежным и перспективным технологическим процессом для ремонта трубопроводов в космических условиях есть сварка. Целью данной работы является разработка специализированного оборудования и технологий для сварки ремонта трубопроводов внутри и за бортом космических пилотируемых станций. Для проведения исследований по сварке трубчатых соединений было создано лабораторное оборудование, разработаны технологии сварки и ремонта неповоротных трубопроводов для космических условий. Для этого были разработаны технологии орбитальной сварки труб из нержавеющей сталей и титановых сплавов аргонодуговым и электронно-лучевым способами. Определены режимы сварки (ток сварки, напряжение дуги и ускоряющее напряжение электронного пучка, скорости сварки). Исследованы предварительные режимы орбитального проплавления сплошных трубчатых образцов и режимы сварки неповоротных стыковых соединений одно- и многопроходными швами. При первом проходе сварку выполняли со сквозным проплавлением для формирования корневого валика, а повторные проходы по первому и последующему швам выполняли как наплавочные с завершающим формированием верхнего валика и постепенным выводом кратера. Изучены механические свойства полученных сварных соединений при комнатных и низких температурах и их химический состав. Исследованы макро- и микроструктура и твердость полученных сварных соединений. Проведены испытания стойкости сварных соединений на межкристаллитную коррозию. Испытания на временное сопротивление разрыву стыковых трубчатых соединений нержавеющей и титановых сплавов при температурах испытаний +20 °C и –196 °C показали, что сварка орбитальными аргонодуговым и электронно-лучевым способами позволяет получить соединения, близкие по прочности к основному металлу. Исследования на химическую неоднородность показали, что сварные соединения, полученные аргонодуговым и электронно-лучевым способами, равнозначны по химическому составу с основным металлом. Исследования макро- и микроструктур, геометрии и твердости соединений из нержавеющей и титановых сплавов, полученных орбитальными способами, показали удовлетворительное и стабильное качество этих соединений. Проведенные испытания на МКК свидетельствуют о стойкости к межкристаллитной коррозии трубчатых соединений из стали 12X18H10T и титанового сплава ПТ-3В, которые получены орбитальными способами аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой. Впер-

вые разработаны и изготовлены опытные образцы оборудования и принципиальные технологии орбитальной аргонно-дуговой и электронно-лучевой сварки внутри и снаружи функционирующей космической станции. Проведены испытания изготовленного оборудования, на котором получены орбитальным способом опытные образцы стыковых трубчатых соединений для механических и физико-химических исследований. Результаты механических и физико-химических исследований показали, что орбитальные способы аргонно-дуговой и электронно-лучевой сварки позволяют получить качественные соединения, близкие по прочности и химическому составу к основному металлу.

Ключевые слова: космические станции, трубопроводы, неповоротные стыки, аргонно-дуговая сварка, электронно-лучевая сварка, нержавеющие стали, титановые сплавы, трубчатые соединения, микрокамера, электронно-лучевой нагреватель, режимы сварки, автоопрессовка, внешние дефекты, внутренние дефекты, механические свойства, химические свойства, макро- и микроструктура, микротвердость, межкристаллитная коррозия.

L. M. Lobanov, E. A. Asnis, E. G. Ternovoi, V. F. Shulym, A. R. Bulactev, V. A. Kryukov, T. A. Likarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR ORBITAL WELDING AND REPAIR OF PIPELINES IN SPACE

The orbital space stations consist of a large number of pipelines made of various types of corrosion-resistant materials (stainless steel, titanium alloys, etc.). They are located both inside and outside the space station. These pipes can wear out for various reasons (corrosion, mechanical damage, etc.) during the long-term exploitation of the station, and so there is a need for their repair in space conditions. Studies conducted at the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine showed that a reliable and prospective pipeline repair process in space conditions is the welding. We present the results of a development of specialized equipment and welding technologies for the repair of pipelines inside and outside the manned spacecrafts. The issues related to the design of the laboratory equipment for the welding of tubular connections as well as the development of welding technologies and equipment for the repair of fixed pipelines in the space environment are considered. We have developed the technology of orbital welding of pipes of stainless steels and titanium alloys by means of the

argon arc and the electron beam welding methods. The technological requirements for modes of welding (welding current, arc voltage and the accelerating voltage of the electron beam, the speed of welding) are defined. Preliminary modes of the orbital weld penetration of solid tube samples and butt joints welding modes with single and multi-pass seams were studied. On the first pass the welds were performed with the formation of the penetration bead. The repeated passes along the first and subsequent seams were performed as a surfacing with the final formation of the top bead and gradual formation of the crater. Mechanical properties of the obtained welded joints at the room and low temperatures and their chemical composition as well as their macro and microstructure and hardness are studied. The resistance of welded joints to intergranular corrosion was tested. Tests for temporal resistance to rupture of tubular butt-joints of stainless and titanium alloys were made at the test temperatures of + 20 °C and –196 °C. They showed that the welding with orbital argon-arc and electron-beam methods makes it possible to obtain the joints that are close in strength to the base metal. The studies on a chemical heterogeneity have shown that welded joints performed by argon-arc and electron-beam methods are equivalent in chemical composition to the base metal. Studies of macro and microstructures, geometry and hardness of joints made of stainless and titanium alloys and performed by orbital methods have demonstrated a satisfactory and stable quality of these joints. The results of tests carried out at the International Space Station showed the resistance of tubular joints from the 12X18H10T steel and PT-3B titanium alloy to intercrystalline corrosion. Both joints are performed by orbital methods with the argon-arc and electron-beam welding. For the first time, the prototypes of equipment and basic technologies of orbital argon-arc and electron-beam welding inside and outside the operating space station are developed and manufactured. During the tests of the equipment, the prototypes of butt-type tubular joints for mechanical and physicochemical studies were obtained by the orbital method. The results of the studies have shown that the orbital methods of argon-arc and electron-beam welding make it possible to obtain qualitative joints that are close in strength and chemical composition to the main metal.

Keywords: space stations, pipelines, toggling joints, argon arc welding, electron beam welding, stainless steel, titanium alloys, tubular joints, mikrocamera, electron beam welding modes, heater, autopressurization, external defects, internal defects, mechanical properties, chemical properties, macro- and microstructure, microhardness, intergranular corrosion.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.048>

УДК 58.031:577.352.4:582.736.3

Є. Л. Кордюм¹, О. М. Клименко¹, І. В. Булавін¹, І. В. Жупанов¹, Т. В. Воробйова¹, Е. Рюланд²

¹ Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ, Україна

² Інститут екології та наук про навколишнє середовище, Університет Парижа Ест-Кретеї, Париж, Франція

ЛІПІДНІ РАФТИ РОСЛИННИХ КЛІТИН ЧУТЛИВІ ДО ВПЛИВУ МОДУЛЬОВАНОЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ (КЛИНОСТАТУВАННЯ)

*Рослини як джерело кисню та їжі для космонавтів визнані ключовим компонентом біорегенеративних систем життєзабезпечення. Біологічні мембрани, насамперед цитоплазматична мембрана (ЦМ), за своїми якостями та функціями можуть відігравати важливу роль в адаптації рослин до мікрогравітації. Доведено наявність в ЦМ функціональних доменів, які отримали назву «ліпідних рафтів». Припускається, що рафти модулюють білкові взаємодії і таким чином включаються у численні життєво важливі клітинні процеси. Дослідження ліпідних рафтів допомагають пояснити біохімічні процеси, що відбуваються в клітинних мембранах у нормі та відповідях на стрес. Наша стаття торкається проблеми пізнання ступеня гравічутливості основних клітинних процесів та адаптивного потенціалу рослин до умов мікрогравітації, що конче потрібно для розробки технологій космічного рослинництва у біорегенеративних системах життєзабезпечення. Мета полягає у з'ясуванні ступеня гравічутливості ліпідних рафтів рослинних клітин за такими ознаками, як склад і вміст насичених і ненасичених жирних кислот і стеринів. Матеріали й методи дослідження стосувалися проростків гороху *Pisum sativum* L. сорту Берсек, який вирощували протягом 6 діб у контролі та при дії повільного горизонтального клиностатування. На сьому добу від проростків відрізали корені, виділяли з них фракцію ЦМ, із якої отримували фракцію рафтів із використанням центрифуги «Optima L-90K». Фракцію рафтів досліджували методами електронної мікроскопії за допомогою електронного мікроскопа JEM 1230 (JEOL, Японія) і газової хроматографії на апараті HRGC 5300 («Carlo Erba Instruments», Італія). Показано, що рафти мають вигляд тонких стрічок довжиною від 80 до 100 нм та шириною від 6 до 13 нм. В умовах клиностатування якісний склад основних жирних кислот у фракції рафтів не змінювався, відмінності спостерігалися у їхньому відсотковому вмісті. В умовах модельованої мікрогравітації у фракції рафтів, як і у стаціонарному контролі, переважали насичені жирні кислоти, вміст яких збільшувався, особливо пальмітинової кислоти, відповідно зменшувався відсоток ненасичених жирних кислот, особливо арахідонової кислоти. Відмічено зменшення моноенових ненасичених жирних кислот порівняно із контролем, серед полієнових жирних кислот найбільший відсоток складали тетраєнові жирні кислоти. В умовах клиностатування відсоток холестерину у фракції рафтів збільшувався у сім разів порівняно із контролем. Вперше встановлено значне збільшення холестерину та підвищення вмісту насичених жирних кислот у ліпідних рафтах під впливом клиностатування, що може вказувати на підвищення жорсткості рафтів і, отже, на зміни проникності ЦМ, селективності та активності відповідних білків. Підвищення жорсткості рафтів відбувається на фоні підтримання мікрів'язкості самої мембрани на нормальному рівні. Пропонується посилити увагу до вивчення ролі ліпідних рафтів у гравічутливості рослинних клітин.*

Ключові слова: *Pisum sativum*, цитоплазматична мембрана, рафти, жирні кислоти, стерини, клиностатування.

ВСТУП

Здатність однорічних рослин проходити весь життєвий цикл, від насіння до насіння, в умовах космічного польоту надає можливості досліджувати вплив мікрогравітації на ріст та розвиток

рослин на клітинному та молекулярному рівнях [19, 21]. Такі фундаментальні дослідження, метою яких є пізнання ступеня гравічутливості основних клітинних процесів та адаптивного потенціалу рослин до умов мікрогравітації, що конче потрібно для розробки технологій космічного рослинництва у біорегенеративних системах життєзабезпечення та прогнозу надійності

© Є. Л. КОРДЮМ, О. М. КЛИМЕНКО, І. В. БУЛАВІН,
І. В. ЖУПАНОВ, Т. В. ВОРОБЙОВА, Е. РЮЛАНД, 2018

їхнього функціонування. Рослини як джерело кисню та їжі для космонавтів визнано ключовим компонентом біорегеративних систем життєзабезпечення [12, 37].

Завдяки удосконаленню методик досліджень генної експресії та складу білків сьогодні велика увага приділяється саме з'ясуванню реакції рослин на дію мікрогравітації на транскрипційному та трансляційному рівнях. Вагомим результатом цих досліджень стало відкриття органо- та тканинспецифічності змін генної експресії у відповідь на дію мікрогравітації [29]. Менше уваги приділяється дослідженням фізико-хімічних властивостей біологічних мембран, зокрема цитоплазматичної мембрани (ЦМ), хоча за своїми якостями та функціями вони можуть відігравати важливу роль в адаптації рослин до мікрогравітації. Так, ЦМ розглядається як одна із найбільш динамічних надмолекулярних структур у клітині, яка є проміжною ланкою між цитоплазмою та позаклітинним середовищем і залучається у численні процеси, такі як транспорт метаболітів та іонів, ендоцитоз, проліферація та диференціювання клітин, захист від патогенів [10, 11, 34].

Експериментально показано гравічутливість ЦМ: зміни вмісту фосfolіпідів, жирних кислот і стеаринів [1, 2], доведено безпосередній вплив гравітації на іонні канали, текучість (мікрров'язкість) як штучних ліпідних мембран, так і клітинних мембран [15, 32], що, як припускається, може пояснити деякі біологічні ефекти гравітації. Запропоновано гіпотезу гравітаційної декомпенсації, згідно із якою зміни поверхневого натягу мембрани в умовах мікрогравітації можуть грати роль індуктора, вплив якого посилюється завдяки гетерогенності мембрани по її довжині [20].

В останні десятиріччя ЦМ вже не розглядається як гомогенний бішар, що складається із ліпідів і білків, занурених у ліпідний бішар, або менш щільно, зворотно або незворотно зв'язаних з поверхнею мембрани. Доведено наявність у клітинах функціональних мембранних доменів із специфічною локалізацією та складом ліпідів і білків, особливо в ЦМ, які отримали назву «ліпідних рафтів». Припускається, що рафти, збагачені на холестерин та сфінголіпіди, модулюють біл-

кові взаємодії і таким чином включаються в численні життєво важливі клітинні процеси, такі як передача сигналів, мембранний транспорт, стан стосунків хазяїн — патоген [5—7, 14, 22]. Дослідження ліпідних рафтів допомагають пояснити біохімічні процеси, що відбуваються у клітинних мембранах у нормі та відповідях на стрес, відносно їхньої специфічності, селективності та швидкості, які не можна пояснити за допомогою інших моделей [14].

Тому мета наших досліджень — з'ясувати ступінь гравічутливості ліпідних рафтів рослинних клітин за такими ознаками, як склад і вміст насичених і ненасичених жирних кислот і стеринів.

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проростки гороху *Pisum sativum* L. сорту Берсек вирощували протягом шести діб у контролі та в умовах кліностатування. На сьому добу від проростків відрізали кореневу частину та виділяли з неї фракцію плазматичної мембрани за методом Ларсона [23]. Фракцію плазмалеми отримували методом двофазної водно-полімерної системи із використанням центрифуги «Optima L-90K». Фракцію рафтів отримували із фракції плазматичної мембрани. Для цього використовували ізопікнічне центрифугування, в основі якого лежить розділення часток в залежності від їхньої плавучої щільності. Фракцію плазматичної мембрани ресуспендували, додавали 1 % «Тритон X-100» та витримували 30 хв при температурі 4 °C. В пробірці для центрифугування заливали градієнт сахарози 5-30-35-52 %. Суміш плазматичної мембрани та «Тритону X-100» наносили в градієнт сахарози в шар з 52 % сахарози. Отриману систему центрифугували при 110 000g протягом 16 год. Після центрифугування піпеткою Пастера відбирали фракцію рафтів, яка у вигляді слабко опалесцюючого кільця перебувала в 35 % шарі градієнта. Отриману фракцію знов центрифугували зі швидкістю 28 000 обертів протягом 1 год [1].

Контроль отриманої фракції проводили за допомогою електронної мікроскопії. Фракцію рафтів фіксували в 2.5 % глютаровому альдегіді на 0.1 М кокодилатному буфері (pH 7.2), по-

стфіксували 1 % OsO_4 та заливали в агарові блоки. Агарові блоки зневоднювали в серії спиртів висхідної концентрації та заливали у суміш епоксидних смол [8]. Ультратонкі зрізи, отримані за допомогою ультрамикротому MT-XL («RMR Instruments», США), контрастували ураніл ацетатом та цитратом свинцю та вивчали за допомогою електронного мікроскопа JEM 1230 («Jeol», Японія).

Для визначення складу ліпідів у рафтах ліпідний екстракт готували методом Bligh та Dyer [4]. Для екстракції ліпіди розводили бензолом, переносили в ампулу, додавали 1.5 мл 3М HCl у метанолі (110 мл охолодженого метанолу та 21.5 мл ацетохлориду). Ампулу запаювали та кип'ятили на водяній бані 1 год. Вміст ампули розріджували водою, екстрагували гексаном. Гексан випаровували та отримували метильовані ефіри жирних кислот (МЕЖК), які наносили на пластинки «Sorbfil» для очищення. Як розчинник використовували бензол. Очищені МЕЖК розчиняли у гексані та досліджували методом газової хроматографії на апараті HRGC 5300 («Carlo Erba Instruments», Італія) на скляній набивній колонці 3.5 м, яку було заповнено «Chromosorb W/HP» з нанесеною 10 % рідкою фазою «Sibar 5CP» при програмованій температурі 140...250 °C зі зростанням на 2°/хв. Ідентифікацію окремих жирних кислот провадили за допомогою стандартів фірми «Sigma». Вміст індивідуальних жирних кислот виражали у відсотках від загальної суми жирних кислот. Усі жирні кислоти в залежності від ступеня їхньої насиченості розділяли на групи: насичені (Н) — подвійні зв'язки відсутні, ненасичені: моноєнові (М) — один подвійний зв'язок, дієнові (Д) — два подвійних зв'язки, триєнові (Тр) — три подвійних зв'язки. Коефіцієнт ненасиченості K жирних кислот визначали як відношення суми Σ ненасичених ЖК / до суми Σ насичених ЖК. Індекс подвійного зв'язку (ІПЗ), що характеризує ступінь ненасиченості ліпідів, розраховували за формулою

$$\text{ІПЗ} = (\text{М} + 2 \times \text{Д} + 3 \times \text{Тр} + 4 \times \text{Тетр}) / 100,$$

де М — моноєнові, Д — дієнові, Тр — триєнові, Тетр — тетраєнові кислоти, % від суми жирних кислот.

Якісний склад стеринів фракції рафтів визначали після отримання ліпідів методом [4] на скляній колонці 0.5 м, яку було заповнено «Chromosorb W/HP» з нанесеною фазою 3 % OV-1 при програмованій постійній температурі 250 °C з використанням стандартів до холестерину, ергостеролу, стигмастерину та β -сітостерину фірми Sigma методом газової хроматографії на апараті HRGC 5300 («Carlo Erba Instruments», Італія).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Методом електронної трансмісійної мікроскопії показано, що рафти, виділені з мікросомальної фракції, збагаченої везикулами цитоплазматичної мембрани, отриманої з коренів шести добо-вих проростків гороху, мають вигляд відносно тонких стрічок довжиною від 80 до 100 нм та шириною від 6 до 13 нм (рис. 1).

Аналіз хроматограм рафтів дозволив розділити жирні кислоти на групи, в залежності від ступеня їхньої ненасиченості: насичені, моноєнові, дієнові, триєнові, тетраєнові, та розрахувати індекс подвійного зв'язку (ІПЗ), який характеризує ступінь ненасиченості ліпідів і коефіцієнт ненасиченості K . Вміст основних жирних кислот фосfolіпідів представлено на рис. 2.

В контролі, у фракції рафтів, серед основних жирних кислот, вміст яких становив більше ніж 1 %, виявлено насичені: пальмітинову, стеаринову та арахінову; моноєнові — олеїнову; дієнові — лінолеву; триєнові — ліноленову; тетраєнові — арахідонову. Серед інших жирних кислот кількість насичених — 3.85 %, моноєнових — 3.77 %; дієнових — 0.25 %, триєнових — 0.21 %, тетраєнових — 1.74 %. Вміст не ідентифікованих жирних кислот дорівнював 0.34 %.

За умов клиностатування якісний склад основних жирних кислот у фракції рафтів не змінювався, відмінності спостерігалися у їхньому відсотковому вмісті. Встановлено зменшення вмісту лінолевої кислоти в 2.12 раза та збільшення арахідонової в 3.97 раза порівняно з контролем. Серед інших — встановлено незначне збільшення вмісту насичених — 4.03 % і дієнових — 0.28 % жирних кислот, та зменшення моноєнових — 2.61 %, триєнових — 0.18 % і тетраєнових — 0.54 %

жирних кислот. Вміст не ідентифікованих жирних кислот дорівнював 0.19 %.

Загалом встановлено, що в стаціонарних умовах у фракції рафтів переважали насичені жирні кислоти, відсоток яких становив 64.5 % з переважанням пальмітинової кислоти, відсоток ненасичених жирних кислот становив 35.5 % з переважанням лінолевої кислоти (табл. 1). Відсоток моноєнових ненасичених жирних кислот становив 6.54 %. Серед полієнових жирних кислот переважали дієнові.

За дії модельованої мікрогравітації у фракції рафтів також переважали насичені жирні кислоти та дещо збільшувався їхній вміст — 66.67 % з переважанням пальмітинової кислоти, відповідно зменшувався відсоток ненасичених жирних кислот — 33.33 % з переважанням арахідонової кислоти (табл. 1). В умовах клиностакування відмічено зменшення моноєнових ненасичених жирних кислот — 5.16 % порівняно із контролем, тоді як серед полієнових жирних кислот найбільший відсоток складають тетраєнові жирні кислоти.

Серед стеролів за умов клиностакування відсоток холестерину у фракції рафтів збільшувався у сім разів порівняно із контролем. Вміст інших стеролів майже не змінювався (табл. 2).

Основні відомості щодо структури, складу та можливих функцій ліпідних рафтів ЦМ одержано в дослідженнях мембран клітин тварин і дріжджів. Пізніше опубліковано дані щодо наявності в ЦМ рослинних клітин мікродоменив, збагачених на сфінголіпіди та холестерол і нерозчинних у неіонних детергентах, подібно до ліпідних рафтів клітин савців [3, 5, 7, 14, 16, 22, 25, 28, 30, 33].

Так, було встановлено наявність ліпідних рафтів, збагачених на сфінголіпід, ідентифікований як глікозилцерамід, суміш стигмастеролу, сітостеролу, 2, 4-метилхолестеролу та холестеролу у ЦМ, виділений із листків *Nicotiana tabacum* і культури клітин BY2. Фосфо- та глікогліцероліпіди виявлялися в ліпідних рафтах у невеликій кількості. Дані одно- та двомірного гель-електрофорезу, мас-спектрометрії та імуноблотингу чітко вказують на здатність мікродоменив ЦМ тютюну набирати специфічний набір мембранних білків та виключати інші [26]. Припуска-

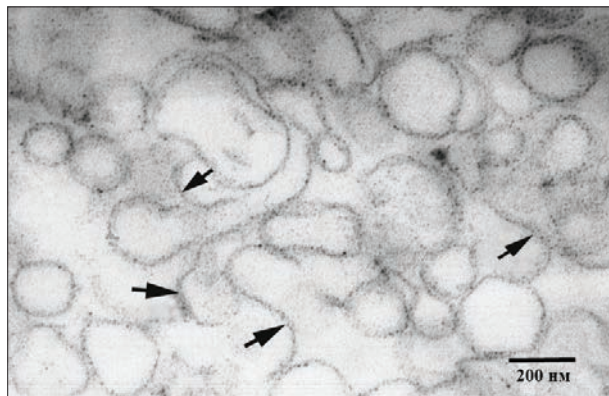


Рис. 1. Рафти, отримані з коренів 6-добових проростків гороху (електронна трансмісійна мікроскопія). Стрілочки вказують на рафти

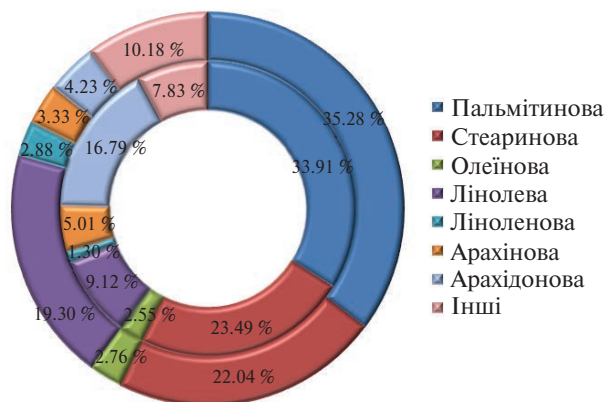


Рис. 2. Основні жирні кислоти фракції рафтів. Зовнішній шар — у контролі, внутрішній — після клиностакування

ється роль рослинних рафтів як платформи для передачі сигналів [27].

За допомогою протеомного аналізу виявлено наявність специфічного набору білків, знайдених в інших ліпідних рафтах, а також наявність редокс-системи навколо цитохрому B_{561} у рафтах, ізольованих із ЦМ коренів *Medicago truncatula* [14, 24].

Припускається можлива фізіологічна роль редокс системи у симбіотичній взаємодії бобових [14]. Структурно рафти ідентифіковано як маленькі (10...12 нм) гетерогенні, високо динамічні домени, збагачені на стероли та сфінголіпіди, полегшують передачу сигналів, контролюючи сегрегацію сигнальних молекул і транспорт мембранних білків. Невеличкі рафти можуть

іноді формувати більші платформи через білок-білок- та білок-ліпід-взаємодії [14, 24].

Показано, що OsRac1, що є членом родини Rac/Rop ГТФаз і відіграє важливу роль як молекулярний перемикач у вродженому імунітеті *Oryza sativa*, може бути асоційований із рафтами ЦМ, виділених із клітин суспензійної культури рису [13].

Таблиця 1. Склад жирних кислот фракції рафтів, %

Жирні кислоти	Контроль, %	Клиноостатування, %
<i>Насичені</i>		
Лінолева	19.3	0.21
Бегенова	1.67	1.55
Міристинова	0.86	0.78
Маргарінова	0.48	0.3
Лауролейнова	0.28	0.12
Генеїкозанова	0.14	0.24
Лаурінова	0.13	0.25
Ізопальмітинова	0.07	0.24
Пеларгонова	0.06	0.07
Пентадеканова	0.06	0.1
Ізостеаринова	0.06	0.07
Тридеканова	0.04	—
Ізолаурінова		0.8
<i>Ненасичені моноєнові</i>		
Пальмітинова	35.28	33.91
Нервонова	2.45	1.4
Пентадеценова	0.37	0.41
Гептадеценова	0.13	0.18
Міристоолеїнова	0.11	—
Ерукова	—	0.34
Пальмітолеїнова	—	0.29
<i>Ненасичені дієнові</i>		
Гексадекадієнова	0.24	0.24
Докозадієнова	—	0.04
<i>Ненасичені триєнові</i>		
Докозатриєнова	0.21	0.06
<i>Ненасичені тетраєнові</i>		
Докозатетраєнова	1.74	0.54
<i>Не ідентифіковані</i>		
	0.22	0.11
	0.08	0.07
	0.05	—
Індекс подвійного зв'язку	0.78	0.98
Коефіцієнт ненасиченості K	0.55	0.5

Ідентифіковано стеролзалежні білки, асоційовані з рафтами та належні до системи сигналіну мембранозв'язаної АБК, з клітин мезофілу *Arabidopsis thaliana*. Серед цих білків визначено протеїн фосфатазу (АБІ негативний регулятор сигналіну АБК) та кальційзалежну протеїн кінразу 21 [9]. Глікопротеїн At-FLA 4 (фасцикліно-подібний арабіногалактан білок 4), закорений на мембранних ліпідах позитивно регулює біосинтез компонентів клітинної стінки та нормальний ріст кореня через АБК-залежний сигнальний шлях. Фасцикліни звичайно асоціюються із зовнішньою поверхнею ліпідних рафтів у ЦМ за допомогою глікозилфосфатидилінозиту [31].

Дефіцит заліза (Fe) викликав зміну 68 білків ліпідних рафтів ЦМ *Beta vulgaris*, причому 50 % відмінності було знайдено по білках сигналіну та загального і везикулярного транспорту. Виявлено також зменшення похідних фосфатидної кислоти, що могло впливати на формування везикул у відповідності до внутрішньоклітинного транспорту та секреції [17].

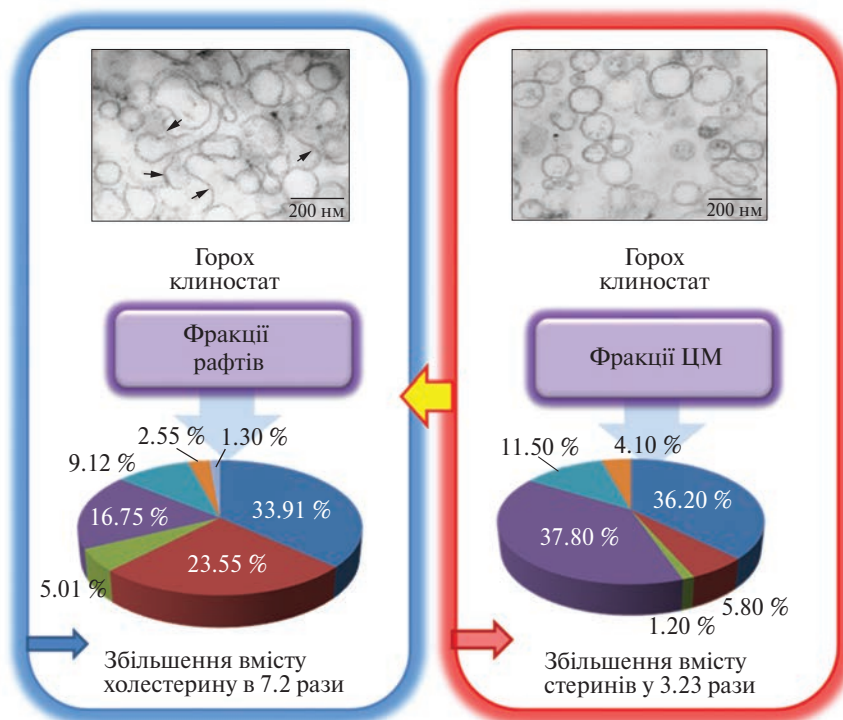
Ліпідні рафти ЦМ суспензійної культури *Rapulus trichocarpa* збагачені на білки, які є маркером передачі сигналів молекулярного транспорту, біосинтезу калози і залучаються у відповідь на абіотичний та біотичний стрес. Каскад подій веде до виходу іонів кальцію на цитоплазматичний бік ЦМ, це необхідно для активації калозо-синтази, як кінцевої відповіді на стрес [35].

Встановлено кореляцію між формуванням ліпідних рафтів і симпластним міжклітинним транспортом, який регулюється плазмодесмами. Динамічна проникненість плазмодесми контролюється калозою, що синтезується калозо-синтазами та деградується β-1,3 глюканазами. Припускається

Таблиця 2. Вміст стеринів у фракції рафтів коренів проростків гороху в контролі та при клиноостатуванні

Стерини	Контроль, %	Клиноостатування, %
Холестерин	0.30	2.16
Ергостерин	9.65	8.95
Стигмастерин	30.59	29.11
β-ситостерин	45.07	43.39
Інші (не ідентифіковані)	14.39	16.39

Рис. 3. Кількість основних жирних кислот з вмістом понад 1% для фракції рафтів та ЦМ за умов клиностатування. Для фракції рафтів насичені жирні кислоти: 33.91 % — пальмітинова, 23.49 % — стеаринова, 5.01 % — арахідова; ненасичені жирні кислоти: 16.79 % — арахідонова, 9.12 % — лінолева, 2.55 % — олеїнова, 1.3 % — ліноленова. Для фракції ЦМ вміст насичених жирних кислот: 32.6 % — пальмітинова, 5.8 % — стеаринова, 1.2 % — міристинова; ненасичені жирні кислоти: 37.80 % — лінолева, 11.50 % — олеїнова, 4.10 % — ліноленова



ся, що зміна складових ліпідних рафтів впливає на гомеостаз калози плазмодесм і, отже, впливає на функціонування плазмодесм [18].

Більшість білків ліпідних рафтів ЦМ однодольних рослин *Avena sativa* та *Secale cereale* були спільними із такими у дводольних рослин *A. thaliana* та *N. tabacum*, що припускає загальні функції білків, асоційованих із рафтами. В той же час рафти вівса та жита містили деякі різні білки. Розподіл певних білків у рафтах є унікальним, що разом із їхніми фізико-хімічними властивостями визначає функції цих специфічних доменів ЦМ в різноманітних фізіологічних процесах у рослинних клітинах [36]. Аналіз наведених літературних даних свідчить про важливу роль рафтів ЦМ у функціонуванні рослинних клітин.

Рафти, вперше виділені нами із коренів 6-добових проростків гороху, які росли у стаціонарних умовах і умовах клиностатування, за структурою та розмірами були подібні до таких ЦМ інших рослин, зокрема *M. trunculata*, і також збагачені на стерини, особливо холестерин, і насичені жирні кислоти. За умов клиностатування у

рафтах значно збільшувався вміст арахідонової кислоти та зменшувався вміст ліноленової. Порівняння вмісту жирних кислот і стеринів у ЦМ коренів 6-добових проростків гороху [1] та виділених з неї фракції рафтів в контролі показало, що фракція ЦМ та фракція рафтів відрізняються між собою як за якісним, так і кількісним складом жирних кислот і стеринів. На відміну від ЦМ у фракції рафтів, як ми вже відмічали, переважали насичені жирні кислоти, та збільшувався вміст стеринів, що є характерним для ліпід-білкових доменів ЦМ і тонопласта рослинних клітин.

Раніше повідомлялося про певні зміни жирнокислотного складу фракції ЦМ, виділеної також із коренів 6-добових проростків гороху, під впливом клиностатування [1, 2]. На шосту добу клиностатування мікрів'язкість ЦМ перебувала на стаціонарному рівні, що, як припускається, обумовлюється новим балансом, який встановлюється між збільшенням або зменшенням ненасичених і насичених жирних кислот в цих умовах і підтримує текучість (мікрів'язкість) ЦМ. Порівняння даних щодо жирнокислотного

складу біліпідного шару ЦМ та виділеної із неї фракції рафтів в умовах клиностатування показало значне підвищення у мікродоменах вмісту насичених жирних кислот порівняно із ЦМ (рис. 3) та холестерину, що свідчить про посилення їхньої щільності. Цікаво, що підвищення жорсткості рафтів в умовах клиностатування відбувається на фоні підтримання мікрров'язкості самої мембрани на нормальному рівні. Оскільки рафти також містять білкові комплекси, необхідні для сприйняття та передачі зовнішніх сигналів, захисту від стресів, везикулярного транспорту [25], значне збільшення стеринів під впливом клиностатування може вказувати на зміни проникності мембрани та селективності та активності відповідних білків.

З огляду на отримані дані пропонується посилити увагу до вивчення ролі рослинних ліпідних рафтів у гравічутливості клітини, оскільки рафти контролюють численні важливі клітинні процеси.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кордюм Є. Л., Недуха О. М., Грахов В. П., Мельник А. К., Воробйова Т. В., Клименко О. М., Жупанов І. В. Дослідження впливу модельованої мікрогравітації на біліпідний шар цитоплазматичної мембрани рослинних клітин // *Космічна наука і технологія*. — 2015. — **21**, № 3. — С. 40—47.
2. Полулях Ю. А. Содержание фосфолипидов и жирных кислот в плазматической мембране клеток корневых гороха при клиностатировании // *Докл. АН УССР. Сер. Биол.* — 1988. — **10**. — С. 67—69.
3. Bhat R., Panstruga R. A. Lipid rafts in plants // *Planta*. — 2005. — **223**. — P. 5—1.
4. Bligh E. Y., Dyer W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification // *Can. J. Biochem. Physiol.* — 1959. — **37**. — P. 911—917.
5. Borner G. H. H., Sherrier D. J., Weimar T., Michaelson L. V., Hawkins N. D., Macaskill A., et al. Analysis of detergent-resistant membranes in *Arabidopsis*. Evidence for plasma membrane lipid rafts // *Plant Physiol.* — 2005. — **137**. — P. 104—116.
6. Brown D. A., London E. Functions of lipid rafts in biological membranes // *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* — 1998. — **14**. — P. 111—136.
7. Cacas J.-L., Furt F., Le Guédard M., Schmitter J. M., Buré C., Gerbeau-Pissot P. Lipids of plant membrane rafts // *Progress in Lipid Res.* — 2012. — **51**. — P. 272—299.
8. Carde J.-P. Electron microscopy of plant cell membranes // *Methods Enzymol.* / Eds L. Packer, R. Douce. — USA: Acad. Press Inc., 1987. — **148**. — P. 599—622.
9. Demir F., Horntrich C., Blachutzik J. O., Scherzer S., Rein- ders Y., Kierszniowska S., et al. *Arabidopsis* nanodomain- delimited ABA signaling pathway regulates the anion channel SLAH3 // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. — 2013. — **110**, N 20. — P. 8296—8301.
10. Edidin M. Lipids on the frontier: a century of cell- membrane bilayers // *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* — 2003. — **4**. — P. 414—418.
11. Engelman D. M. Membranes are more mosaic than fluid // *Nature* — 2005. — **438**. — P. 578—580.
12. Ferl E. J., Wheeler R. M., Levine H. G., Paul A. L. Plants in space // *Curr. Opin. Plant Biol.* — 2002. — **5**. — P. 259—263.
13. Fujiwara M., Hamada S., Hiratsuka M., Fukao Y., Kawasa- ki T., Shimamoto K. Proteome analysis of detergent-resistant membranes (DRMs) associated with OsRac1-mediated innate immunity in rice // *Plant Cell Physiol.* — 2009. — **50**. — P. 1191—1200.
14. Furt F., Lefebvre B., Cullimore J., Bessoule J.-J., Mongrand S. Plant lipid rafts // *Plant Signal Behav.* — 2007. — **2**, N 6. — P. 508—511.
15. Goldermann M., Hanke W. Ion channel are sensitive to gravity changes // *Microgravity Sci. Technol.* — 2001. — **13**. — P. 35—38.
16. Grennan A. K. Lipid rafts in plants // *Plant Physiol.* — 2007. — **143**, N 3. — P. 1083—1085.
17. Gutierrez-Carbonell E., Takahashi D., Lüthje S., González- Reyes J. A., Mongrand S., Contreras-Moreira B., et al. Shotgun proteomic approach reveals that Fe deficiency causes marked changes in the protein profiles of plasma membrane and detergent-resistant microdomain preparations from *Beta vulgaris* roots // *J. Proteome Res.* — 2016. — **15**, N 8. — P. 2510—2524.
18. Iswanto A. B., Kim J. Y. Lipid raft, regulator of plasmodes- mal callose homeostasis // *Plants (Basel)*. — 2017. — **6**, N 2. — 15. — doi: 10.3390/plants6020015.
19. Kittang A.-I., Iversen T. H., Fossum K. R., Mazars C., Carnero- Diaz E., Boucheron-Dubuisson E., et al. Exploration of plant growth and development using the European Modular cultivation System facility on the International Space Station // *J. Plant Biology*. — 2014. — **16**, N 3. — P. 528—538.
20. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // *Int. Rev. Cytol.* — 1997. — **171**. — P. 1—78.
21. Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity // *J. Plant Biology*. — 2014. — **16**, Suppl. 1. — P. 79—90.
22. Kraft M. L. Plasma membrane organization and function: moving past lipid rafts // *Mol. Biol. Cell*. — 2013. — **24**, N 18. — 2765—2768.
23. Larsson Ch., Sommarin M., Widell S. Isolated of highly purified plant plasma membranes and separation of in- side-out and right-side-out vesicles // *Methods in Enzy- mology*. — 1994. — **228**. — P. 451—469.
24. Lefebvre B., Furt F., Hartmann M.-A., Michaelson L. V., Carde J.-P., Sargueil-Boiron F., et al. Characterization of

- lipid rafts from *Medicago truncatula* root plasma membranes: a proteomic study reveals the presence of a raft-associated redox system // *Plant Physiol.* — 2007. — **144**, N 1. — P. 402–418.
25. Lingwood D., Simons K. Lipid rafts as a membrane-organizing principle // *Science.* — 2010. — **327**, N 5961. — P. 46–50.
 26. Mongrand S., Morel J., Laroche J., Claverol S., Carde, J. P. Hartmann M. A., et al. Lipid rafts in higher plant cells: purification and characterization of Triton X-100-insoluble microdomains from tobacco plasma membrane // *J. Biol. Chem.* — 2004. — **279**. — P. 36277–36286.
 27. Mongrand S., Stanislas T., Bayer E. M., Lherminier J., Simon-Plas F. Membrane rafts in plant cells // *Trends Plant Sci.* — 2010. — **15**, N 12. — P. 656–663.
 28. Morel J., Claverol S., Mongrand S., Furt F., Fromentin J., Bessoule J.-J., et al. Proteomics of plant detergent-resistant membranes // *Mol. Cell. Proteomics.* — 2006. — **5**. — P. 1396–1411.
 29. Paul A. L., Zupanska A. K., Schultz E., Ferl R. J. Organ-specific remodeling of the *Arabidopsis* transcriptome in response to spaceflight BMC // *Plant Biol.* — 2013. — **13**. — P. 112–122.
 30. Peskan T., Westermann M., Oelmulle R. Identification of low-density Triton X-100-insoluble plasma membrane microdomains in higher plants // *Eur. J. Biochem.* — 2000. — **267**. — P. 6989–6995.
 31. Seifert G. J., Xue H., Acet T. The *Arabidopsis thaliana* fasciclin like arabinogalactan protein 4 gene acts synergistically with abscisic acid signalling to control root growth // *Ann. Bot.* — 2014. — **114**, N 6. — P. 1125–1133.
 32. Sieber M., Hanke W., Kohn F. P. M. Modification of membrane fluidity by gravity // *Open J. Biophysics.* — 2014. — **4**. — P. 105–111.
 33. Simons K., Ikonen E. Functional rafts in cell membranes // *Nature.* — 1997. — **387**. — P. 569–572.
 34. Sprenger R. R., Jensen O. N. Proteomics and the dynamic plasma membrane: quo vadis? // *Proteomics.* — 2010. — **10**. — P. 3997–4011.
 35. Srivastava V., Malm E., Sundqvist G., Bulone V. Quantitative proteomics reveals that plasma membrane microdomains from poplar cell suspension cultures are enriched in markers of signal transduction, molecular transport, and callose biosynthesis // *Mol. Cell Proteomics.* — 2013. — **12**, N 12. — P. 3874–3885.
 36. Takahashi D., Kawamura Y., Yamashita T., Uemura M. Detergent-resistant plasma membrane proteome in oat and rye: similarities and dissimilarities between two monocotyledonous plants // *J. Proteome Res.* — 2012. — **11**, N 3. — P. 1654–1665.
 37. Wheeler R. M. Plants for human life support in space: from Myers to Mars // *Gravit. Space Biol.* — 2010. — **23**. — P. 25–35.
- ## REFERENCES
1. Kordyum T. L., Nedukha, O. M. Grakhov, V. P., Mel'nik A. K., Vorobyova T. M., Klimenko O. M., Zhupanov I. V. Doslidzhennya vplyvu modelovanoi mikrogravitatsiyi na bilipidnyi shar tsitoplazmatichnoyi membrani roslinnih klitin [Study of the influence of simulated microgravity on the cytoplasmic membrane lipid bilayer of plant cells]. Kosmichna nauka i tehnologiya — *Space Science and Technology*, **21** (3), 40–47 (2015) [in Ukrainian].
 2. Polulyakh Yu. A. Soderzhanie fosfolipidov i zhirnyih kislot v plazmaticheskoy membrane kletok korney goroha pri klinostatirovanii [Phospholipid and fatty acid content in the plasma membrane of pea root cells under clinorotation]. *Doklady AN USSR ser. Biol.— Reports of the Academy of Sciences of the USSR, Section Biol.*, **10**, 67–69 (1988).
 3. Bhat R. A., Panstruga R. Lipid rafts in plants. *Planta*, **223**, 5–1 (2005).
 4. Bligh E. Y., Dyer W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **37**, 911–917 (1959).
 5. Borner G. H. H., Sherrier D. J., Weimar T., Michaelson L. V., Hawkins N. D., Macaskill A., et al. Analysis of detergent-resistant membranes in *Arabidopsis*. Evidence for plasma membrane lipid rafts. *Plant Physiol.*, **137**, 104–116 (2005).
 6. Brown D. A., London E. Functions of lipid rafts in biological membranes. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.*, **14**, 111–136 (1998).
 7. Cacas J.-L., Furt F., Le Gu dard M., Schmitter J.M., Buré C., Gerbeau-Pissot P. Lipids of plant membrane rafts. *Progress in Lipid Research*, **51**, 272–299 (2012).
 8. Carde J.-P. Electron microscopy of plant cell membranes. *Methods Enzymol.* L. Packer R. Douce (Ed.). — USA: Academic Press Inc., **148**, 599–622 (1987).
 9. Demir F., Horntrich C., Blachutzik J. O., Scherzer S., Reinders Y., Kierszniowska S., et al. *Arabidopsis* nano-domain-delimited ABA signaling pathway regulates the anion channel SLAH3. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110** (20), 8296–8301 (2013).
 10. Edidin M. Lipids on the frontier: a century of cell-membrane bilayers. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, **4**, 414–418 (2003).
 11. Engelman D. M. Membranes are more mosaic than fluid. *Nature*, **438**, 578–580 (2005).
 12. Ferl E. J., Wheeler R. M., Levine H. G., Paul A. L. Plants in space. *Curr. Opin. Plant Biol.*, **5**, 259–263 (2002).
 13. Fujiwara M., Hamada S., Hiratsuka M., Fukao Y., Kawasaki T., Shimamoto K. Proteome analysis of detergent-resistant membranes (DRMs) associated with OsRac1-mediated innate immunity in rice. *Plant Cell Physiol.*, **50**, 1191–1200 (2009).
 14. Furt F., Lefebvre B., Cullimore J., Bessoule J.-J., Mongrand S. Plant lipid rafts. *Plant Signal Behav.*, **2** (6), 508–511 (2007).

Стаття надійшла до редакції 04.01.18

15. Goldermann M., Hanke W. Ion channel are sensitive to gravity changes. *Microgravity Sci. Technol.*, **13**, 35–38 (2001).
16. Grennan A. K. Lipid rafts in plants. *Plant Physiol.*, **143** (3), 1083–1085 (2007).
17. Gutierrez-Carbonell E., Takahashi D., Lüthje S., González-Reyes J. A., Mongrand S., Contreras-Moreira B., et al. Shotgun proteomic approach reveals that Fe deficiency causes marked changes in the protein profiles of plasma membrane and detergent-resistant microdomain preparations from *Beta vulgaris* roots. *J. Proteome Res.*, **15** (8), 2510–2524 (2016).
18. Iswanto A. B., Kim J. Y. Lipid raft, regulator of plasmodesmal callose homeostasis. *Plants (Basel)*, **6** (2), 15. (2017). doi: 10.3390/plants6020015
19. Kittang A. I., Iversen T. H., Fossum K. R., Mazars C., Carnero-Diaz E., Boucheron-Dubuisson E., et al. Exploration of plant growth and development using the European Modular cultivation System facility on the International Space Station. *J. Plant Biology*, **16** (3), 528–538 (2014).
20. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating. *Int. Rev. Cytol.*, **171**, 1–78 (1997).
21. Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *J. Plant Biology*, **16** (Suppl. 1), 79–90 (2014).
22. Kraft M. L. Plasma membrane organization and function: moving past lipid rafts. *Mol. Biol. Cell.*, **24** (18), 2765–2768 (2013).
23. Larsson Ch., Sommarin M., Widell S. Isolated of highly purified plant plasma membranes and separation of inside-out and right-side-out vesicles. *Methods in Enzymology*, **228**, 451–469 (1994).
24. Lefebvre B., Furt F., Hartmann M.-A., Michaelson L. V., Carde J.-P., Sargueil-Boiron, F., et al. Characterization of lipid rafts from *Medicago truncatula* root plasma membranes: a proteomic study reveals the presence of a raft-associated redox system. *Plant Physiol.*, **144** (1), 402–418 (2007).
25. Lingwood D., Simons K. Lipid rafts as a membrane-organizing principle. *Science*, **327** (5961), 46–50 (2010).
26. Mongrand S., Morel J., Laroche J., Claverol S., Carde J. P., Hartmann M. A., et al. Lipid rafts in higher plant cells: purification and characterization of Triton X-100-insoluble microdomains from tobacco plasma membrane. *J. Biol. Chem.*, **279**, 36277–36286 (2004).
27. Mongrand S., Stanislas T., Bayer E. M., Lherminier J., Simon-Plas F. Membrane rafts in plant cells. *Trends Plant Sci.*, **15** (12), 656–663 (2010).
28. Morel J., Claverol S., Mongrand S., Furt F., Fromentin J., Bessoule J.-J., et al. Proteomics of plant detergent-resistant membranes. *Mol. Cell. Proteomics*, **5**, 1396–1411 (2006).
29. Paul A. L., Zupanska A. K., Schultz E., Ferl R. J. Organ-specific remodeling of the *Arabidopsis* transcriptome in response to spaceflight BMC. *Plant Biol.*, **13**, 112–122 (2013).
30. Peskan T., Westermann M., Oelmüller R. Identification of low-density Triton X-100-insoluble plasma membrane microdomains in higher plants. *Eur. J. Biochem.*, **267**, 6989–6995 (2000).
31. Seifert G. J., Xue H., Acet T. The *Arabidopsis thaliana* fasciclin like arabinogalactan protein 4 gene acts synergistically with abscisic acid signalling to control root growth. *Ann. Bot.*, **114** (6), 1125–1133 (2014).
32. Sieber M., Hanke W., Kohn F. P. M. Modification of membrane fluidity by gravity. *Open J. Biophysics*, **4**, 105–111 (2014).
33. Simons K., Ikonen E. Functional rafts in cell membranes. *Nature*, **387**, 569–572 (1997).
34. Sprenger R. R., Jensen, O. N. Proteomics and the dynamic plasma membrane: quo vadis? *Proteomics*, **10**, 3997–4011 (2010).
35. Srivastava V., Malm E., Sundqvist G., Bulone V. Quantitative proteomics reveals that plasma membrane microdomains from poplar cell suspension cultures are enriched in markers of signal transduction, molecular transport, and callose biosynthesis. *Mol. Cell Proteomics*, **12** (12), 3874–3885 (2013).
36. Takahashi D., Kawamura Y., Yamashita T., Uemura M. Detergent-resistant plasma membrane proteome in oat and rye: similarities and dissimilarities between two monocotyledonous plants. *J. Proteome Res.*, **11** (3), 1654–1665 (2012).
37. Wheeler R. M. Plants for human life support in space: from Myers to Mars. *Gravit. Space Biol.*, **23**, 25–35 (2010).

Received 04.01.18

Є. Л. Кордюм¹, Е. Н. Клименко¹, І. В. Булавин¹,
І. В. Жупанов¹, Т. В. Воробйова¹, Э. Рюланд²

¹ Інститут ботаніки ім. Н. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ, Україна

² Інститут екології і наук об оточуючій середі, Університет Парижа Ест-Креть, Париж

ЛИПИДНЫЕ РАФТЫ КЛЕТОК РАСТЕНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫ К ВЛИЯНИЮ МОДЕЛИРОВАННОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ (КЛИНОСТАТИРОВАНИЕ)

Растения как источник кислорода и пищи для космонавтов признаны ключевым компонентом биорегенеративных систем жизнеобеспечения. Биологические мем-

браны, в первую очередь цитоплазматическая мембрана (ЦМ), по своим свойствам и функциям могут играть важнейшую роль в адаптации растений к микрогравитации. Доказано наличие в ЦМ функциональных доменов, получивших название «липидных рафтов». Предполагается, что рафты модулируют белковые взаимодействия и таким образом включаются в многочисленные жизненно важные клеточные процессы. Исследования липидных рафтов способствуют выяснению биохимических процессов, происходящих в клеточных мембранах в норме и в ответах на стресс. Наша статья затрагивает проблему изучения степени гравичувствительности основных клеточных процессов и адаптивного потенциала растений в условиях микрогравитации, что крайне необходимо для разработки технологий космического растениеводства в биорегенеративных системах жизнеобеспечения. Цель работы — выяснить степень гравичувствительности липидных рафтов растительных клеток по таким показателям, как состав и содержание насыщенных и ненасыщенных жирных кислот и стероидов. Материалы и методы исследования применены к проросткам гороха *Pisum sativum* L. сорта Берсек, который выращивали в течение 6 суток в контроле и в условиях медленного горизонтального клиностаивания. На седьмые сутки у проростков отрезали корни, выделяли из них фракцию ЦМ, из которой получали фракцию рафтов с использованием центрифуги «Optima L-90K». Фракцию рафтов исследовали методами электронной микроскопии с помощью электронного микроскопа JEM 1230 (JEOL, Япония) и газовой хроматографии на аппарате HRGC 5300 («Carlo Erba Instruments», Италия). Показано, что рафты имеют вид тонких ленточек длиной от 80 до 100 нм и шириной от 6 до 13 нм. В условиях клиностаивания качественный состав основных жирных кислот во фракции рафтов не изменялся, различия отмечены в их процентном содержании. Под влиянием моделируемой микрогравитации во фракции рафтов, как и в стационарном контроле, содержание насыщенных кислот было больше содержания ненасыщенных и увеличивалось, особенно пальмитиновой кислоты, соответственно уменьшался процент ненасыщенных жирных кислот, особенно арахидоновой кислоты. Отмечено уменьшение содержания моноеновых ненасыщенных жирных кислот по сравнению с контролем, среди полиеновых жирных кислот наибольший процент составляли тетраеновые жирные кислоты. В условиях клиностаивания процент холестерина во фракции рафтов увеличивался в семь раз по сравнению с контролем. Впервые установлено значительное повышение содержания холестерина и насыщенных жирных кислот в липидных рафтах в условиях клиностаивания, что может быть свидетельством усиления жесткости рафтов и, соответственно, изменений проницаемости ЦМ, селективности и активности соответствующих белков. Повышение жесткости рафтов происходит на

фоне поддержания микровязкости самой мембраны на нормальном уровне. Предлагается уделить значительное внимание изучению роли липидных рафтов в гравичувствительности растительных клеток.

Ключевые слова: *Pisum sativum*, цитоплазматическая мембрана, рафты, жирные кислоты, стероиды, клиностаивание.

*E. L. Kordyum*¹, *O. Klymenko*¹, *I. V. Bulavin*¹,
*I. V. Zhupanov*¹, *T. M. Vorobyova*¹, *E. Ruelland*²

¹ М. G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Institute of Ecology and Environmental Sciences, University Paris-Est Creteil, Paris

LIPID RAFTS IN PLANT CELLS ARE SENSITIVE TO THE INFLUENCE OF SIMULATED MICROGRAVITY (CLINOROTATION)

Plants as the sources of oxygen and food for astronauts have been recognized as a key component of Bioregenerative Life Support System. Biological membranes, first of all, the plasmalemma, can play a crucial role in the adaptation of plants to microgravity due to their properties and functions. The presence of functional domains called as the “lipid rafts” was proved in the plasmalemma. It is assumed that rafts modulate protein interactions and, thus, they are involved in numerous essential cell processes. The investigations of lipid rafts promote to understand the biochemical processes occurring in cell membranes in the norm and in response to stress. Problematics of our study is the understanding a degree of gravisensitivity of basic cell processes and an adaptive potential of plants in the microgravity conditions that is extremely important for working out the technologies of plant cultivation in the Bioregenerative Life Support System. Objective of our study is to find out a degree of gravisensitivity of lipid rafts in plant cells on such indices as the composition and content of saturated and unsaturated fatty acids and sterols. Materials and methods are concerning with the pea seedlings, kind Bersek, which were growing during 6 days in the stationary conditions and under slow horizontal clinorotation. On the 7th day, the seedlings were cut off from the roots. A raft fraction was obtained from the plasmalemma fraction isolated from roots using a centrifuge “Optima L-90K”. The raft fraction was investigated by the methods of electron microscopy with an electron microscope JEM 1230 (JEOL, Japan) and gas chromatography using an apparatus HRGC 5300 (“Carlo Erba Instruments”, Italy). It was shown that rafts look like thin ribbons 80–100 nm long and 6–13 nm wide. Under clinorotation, the qualitative composition of main fatty acids in the raft fraction did not change; the differences were found in their percentage. Under the influence of simulated microgravity, the content of saturated fatty acids was greater than the content of unsaturated fatty acids as well as it has been increased, especially a palmitic acid, both in the raft fraction

and in the stationary control. Thereafter, a percent of unsaturated fatty acids decreased, especially arachidonic acid. A decrease in the content of monoenic unsaturated fatty acids in comparison with control was noted too. Content of a tetraenoic fatty acids has a highest percentage among polyene fatty acids. Under clinorotation, a percent of the cholesterol in the raft fraction has been increased 7 times in comparison with control. For the first time, the essential increase in the content of cholesterol and some saturated fatty acids in lipid rafts under clinorotation has been shown. This may indicate a

raft rigidity strengthening under simulated microgravity that can lead to changes in plasmalemma permeability, selectivity and activity of corresponding proteins. A higher raft rigidity occurs against the backdrop of maintaining microviscosity of the membrane itself at the normal level. It is proposed to emphasize attention on the research of the role of lipid rafts in plant cell gravisensitivity.

Keywords: *Pisum sativum*, plasmalemma, rafts, fatty acids, sterols, clinorotation.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.059>

УДК52-85; 52-34

Л. В. Рыхлова

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

ЗЕМЛЯ И ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО: ИССЛЕДОВАНИЯ, ОТКРЫТИЯ, ПРОБЛЕМЫ

За 60 лет, прошедших с момента запуска первого искусственного спутника Земли, исследование космоса превратилось в одну из самых динамичных и плодотворных областей науки, развивающуюся во многих направлениях — от космической геодезии и зондирования Земли из космоса до изучения Вселенной по всему спектру электромагнитных волн. Космическая промышленность стала неотъемлемой частью мировой экономики. Однако одновременно появилась и стала быстро нарастать популяция техногенных объектов — космического мусора, появляющегося на всех этапах полета. Наблюдения, изучение и прогнозирование космического мусора стали новым направлением астрономии.

Ключевые слова: околоземная астрономия, околоземное пространство, космический мусор, оптические наблюдения.

ЗЕМЛЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Земля, с ее атмо-, гидро-, лито- и биосферой представляет собой единую экосистему, сосуществующую с окружающей средой. Для Земли окружающая среда — это околоземное космическое пространство (ОКП) — внешняя газовая оболочка, окружающая Землю и предохраняющая ее от воздействия процессов, непрерывно происходящих в сложной системе «Солнце — межпланетная среда — Земля».

Что такое «околоземное пространство»? Где оно начинается и где его граница? Международная федерация астронавтики установила условную границу между атмосферой и космосом на высоте 100 км над уровнем моря. На этой высоте авиация становится уже невозможной, а спутники начинают входить в атмосферу и разрушаться.

Высота 80...100 км считается максимальной высотой начала сгорания метеоров и болидов. На высоте 400 км работает МКС. Атмосфера за-

щищает поверхность Земли и все живое на ней от негативного воздействия окружающей среды, рассеивает и поглощает инфракрасное и коротковолновое излучение Солнца, не пропускает значительную часть космического радиоизлучения, ослабляет поток высокоэнергичных частиц, идущих к Земле из космоса. Внешняя часть атмосферы — ионосфера — взаимодействует с магнитосферой — самой внешней защитной оболочкой Земли, образующейся при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли. Граница магнитосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли располагается примерно на расстоянии 10 радиусов Земли (примерно 60000 км), а с ночной стороны Земли магнитосфера вытянута на миллионы километров, т. е. выходит далеко за орбиту Луны. При возмущенном состоянии магнитосферы на Земле отмечаются магнитные бури.

Сложнейшие солнечно-земные связи определяют условия жизни на Земле, что вызывает опасения из-за антропогенного воздействия на

© Л. В. РЫХЛОВА, 2018

ОКП — выбросов химических веществ при работе двигателей ракет, создание энергетических и динамических возмущений в результате полетов ракет, загрязнение почвы твердыми фрагментами, радиоактивное загрязнение от ядерных взрывов и др. [1].

Начало космической эры и последовавшее за ним интенсивное освоение космического пространства позволяет считать, что проблема определения границ ОКП обусловлена расширением сферы человеческой деятельности, отодвигая эти границы все дальше от Земли. Высота 35786 км — это высоты навигационных спутников и геостационарной орбиты. Высокоэллиптические орбиты простираются до 47000 км. А это уже 8 земных радиусов, если считать от поверхности Земли.

Поэтому в настоящее время четкого определения границ ОКП — нет.

В США принято делить ОКП на долунное и залунное. Долунное — это около 384400 км, или примерно 60 радиусов Земли. Залунное определяется одной астрономической единицей АЕ (это 23481 радиус Земли).

Область пространства, где притяжение Земли все еще превосходит притяжение Солнца, это 260 000 км — радиус сферы тяготения Земли. Радиус сферы Хилла — 1497000 км — ограничивает ОКП той частью пространства, в которой могут двигаться тела, оставаясь спутниками Земли, и максимальная высота ее орбитальных спутников с периодами обращения 1 год.

Основные факторы, которые принимаются при этом в расчет, это физические свойства и природные особенности ОКП: гравитационное, магнитное и электронное поля Земли, процессы в ионосфере Земли, глубокий космический вакуум, тепловое излучение, космические лучи и солнечное излучение, радиационные пояса Земли.

Метеороиды, астероиды и другие небесные тела пересекают ОКП и покидают его, за исключением редких случаев падения на Землю.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Первый искусственный спутник Земли (ИСЗ) открыл огромные возможности для изучения Земли как планеты: ее фигуры и гравитационно-

го поля, структуры ее атмосферы, уточнения значений фундаментальных астрометрических и геодезических постоянных, определения и изучения параметров вращения Земли, исследования Мирового океана. Возникла необходимость пересмотра принципов и методов установления опорных систем координат, связанных как с телом Земли, так и с небесными светилами.

Специфика исследований Земли с помощью ИСЗ требует длительного накопления массива данных со станций наблюдений, распределенных по всему земному шару, с привлечением разных современных, быстро модернизирующихся средств и методов. Со времени запуска первого ИСЗ было организовано множество международных программ и проектов наблюдений и исследований с использованием фотографических, радиотехнических, лазерных, других методов наблюдений специальных спутников. Выполнение таких программ и непрерывное совершенствование теории движения спутников, возможностей вычислительной техники и аппаратуры для наблюдений позволили подойти к точностям, достаточным для изучения геодинимических величин, имеющих порядок нескольких миллиметров, нескольких микрогал, нескольких тысячных долей секунды.

Определение параметров верхней атмосферы на основе анализа возмущений орбит ИСЗ было первой и достаточно очевидной научной задачей: анализ кратковременных вариаций плотности атмосферы и создание на этой основе моделей атмосферы для их использования затем в задачах улучшения орбит ИСЗ, изучение быстрых вариаций плотности атмосферы для высот от 200 до 800 км, связанных с активностью Солнца, выявление причинно-следственных связей между физико-химическими процессами, ответственными за динамику верхней атмосферы.

Уже самые первые наблюдения позволили поновому подойти к задаче определения фигуры Земли и параметров ее гравитационного поля. Первым научным направлением оказалась космическая геодезия, точнее метод космической триангуляции. ИСЗ — это высокая, т. е. видимая с очень больших расстояний визирная цель, правда перемещающаяся с большой скоростью.

Геодезические сети, образованные системой расстояний до ИСЗ, появились быстро.

Международные научные симпозиумы отражали постепенные изменения основных исследований в соответствии с прогрессом возможностей космической геодезии. Если на первом симпозиуме (Вашингтон, 1962 г.) обсуждались теоретические проблемы небесной механики и техники наблюдений на станциях оптического слежения за ИСЗ, то первые результаты определения положений станций и высот геоида (с точностью 10...20 см) были объявлены уже на втором симпозиуме (Афины, 1965 г.). При этом, кроме оптических наблюдений, использовались в обработке и доплеровские.

Новые типы инструментов в космической геодезии появлялись быстро, в их числе спутниковый альтиметр, спутниковый градиометр. Соответственно развивались и методы измерений градиентов геопотенциала с помощью нового оборудования на спутниках. Уже через несколько месяцев после запуска первого ИСЗ было определено значение сжатия Земли как $1/298.3$.

Из анализа возмущений орбит ИСЗ были получены так называемые Модели Стандартной Земли, включающие в качестве определяемых величин параметры гравитационного поля Земли и геоцентрические координаты станций слежения. Модели различаются объемом использованных данных, методом их отбора, способами обработки. Известны модели Годдардовского центра полетов США — GEM 1-10, несколько французских моделей под общим шифром GRIM, а в Смитсоновской астрофизической обсерватории США — серия моделей SE (Стандартная Земля). В этих моделях использовались комбинации наземных гравиметрических и спутниковых данных.

При высокоточных определениях гравитационного поля и геоида неизбежным становится заметное влияние на орбиты ИСЗ небольших отклонений Земли от твердого, равномерно вращающегося тела. Изменения скорости вращения Земли были обнаружены позднее, но изменение ориентировки оси вращения в теле Земли, проявляющееся как функция времени, было замечено уже в конце XIX века. Движение полюса враще-

ния Земли относительно среднего полюса имеет радиус около 10...15 м. Поскольку положения ИСЗ определялись в это время с точностью 1—2 м, чандлеровское движение полюса оказалось вполне ощутимым, и оно фактически наблюдалось, например, из анализа данных наблюдений со станций спутников серии «Транзит» [4].

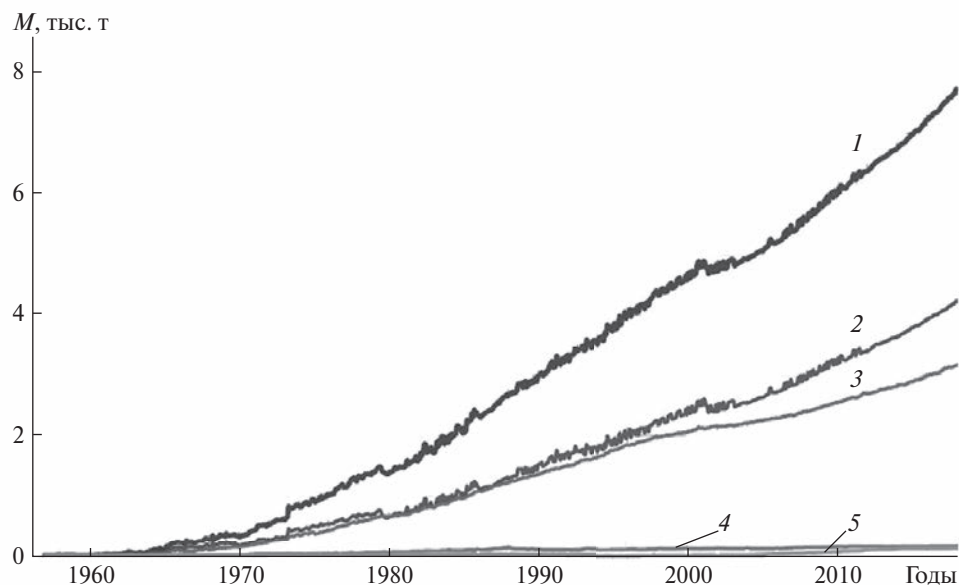
В настоящее время проблема изучения вращения Земли подразумевает решение трех задач:

- определение положений точек земной поверхности, скоростей их изменения и положения центра масс Земли;
- определение изменений ориентации оси вращения в теле Земли (движение полюсов) и в пространстве (прецессия и нутация), а также определение и изучение вариаций скорости вращения Земли;
- определение временных вариаций гравитационного поля Земли.

Эти исследования выполняются в основном с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ); глобальных навигационных спутниковых систем: российской ГЛОНАСС, американской GPS, китайской COMPASS, европейской GALILEO; метода радиотехнических (доплеровских) наблюдений ИСЗ (система DORIS) и лазерных наблюдений спутников (SLR) и Луны (LLR). Каждый из этих методов решает свои задачи.

Новая эра в изучении гравитационного поля Земли началась в 2000 году. Европейское космическое агентство открыло программу изучения гравитационного поля Земли с запуска научного спутника Земли CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), двух идентичных спутников проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в 2002 г., и спутника GOCE (Gravity Field and Steady Ocean Circulation Explorer) в 2009 году. На составленной карте гравитационного поля и гравитационных аномалий с точностью 1—2 см Земля выглядит как гигантская картофелина в космосе, точность определения геоида улучшена до 1—2 см на масштабах порядка 100 км [7]. Результаты этих проектов внесли огромный вклад в геофизику, геодинамику, гидрологию, океанологию, сейсмологию, теорию фигуры Земли.

Под эгидой Международной геодезической ассоциации создана Глобальная геодезическая



Техногенная масса на околоземных орбитах, данные на начало 2018 г.: кривая 1 — всего, 2 — КА, 3 — корпуса ракет, 4 — осколки, 5 — отходы миссий

система наблюдений (Global Geodetic Observing System — GGOS) — сбор, обработка и анализ данных, поступающих от глобальных навигационных спутниковых систем DORIS, РСДБ (VLBI) и LLR, принятых с пунктов наземных геодезических сетей GGOS. Составной частью GGOS являются также наземные гравиметрические обсерватории, использующие спутники при составлении карт гравитационного поля Земли. В качестве главных проблем на ближайшие 10—15 лет в изучении Земли с целью регистрации глобальных планетарных изменений поставлены: мониторинг водного цикла в мировом и региональных масштабах, исследования уровня мирового океана и ледниковых масс. Амплитуды этих изменений — несколько мм в год.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ЗЕМЛИ. ПРОБЛЕМЫ

За 60 лет космическая деятельность стала неотъемлемой частью мировой экономики: если до 1990-х гг. в освоении космоса участвовали только СССР и США, то теперь — более 50 стран.

Количество запусков ракетно-космической техники в ОКП за эти 60 лет приближается к 6000. О факторах воздействия этой техники на наземную космическую инфраструктуру (падение первых, а иногда и вторых ступеней ракет на Землю, пролив остатков топлива по поверхности, загрязнение почв и грунтовых вод, химическое загрязнение приземных слоев атмосферы, тропосферы и нижней стратосферы, воздействие запусков на озоновый слой Земли, образование «дыр» в ионосфере при полете ракеты с работающим двигателем и др.) написано много [1].

В настоящее время более или менее регулярно наблюдаются и устойчиво сопровождаются более 23 000 космических объектов (КО), из которых около 17 000 занесены в каталоги [1]. При этом действующих аппаратов в каталогах только 5 %, т. е. всего около 1200. Остальные 95 % — это крупный мусор с массой объектов от 20 до 300 г, суммарная масса которых превышает 10000 тонн (см. рисунок) [6].

В отличие от метеоров, астероидов и комет, длительность пребывания КМ в ОКП зависит от высоты его орбиты и может достигать десятков,

сотен тысяч и миллионов лет. Другие его особенности состоят в высокой скорости движения, в том, что он может оказаться на пути действующих КА, и, наконец, в невозможности экологически чисто утилизировать его [1]. Следует отметить еще, что КМ при его динамике занимает огромное пространство, что затрудняет его отслеживание. Большинство фрагментов космического мусора имеют большое значение парусности (отношения площади миделева сечения к массе). Орбиты таких фрагментов трудно прогнозируемы в силу неизвестного характера вращения и переменности значения парусности. В Институте астрономии РАН ведутся исследования особенностей изменения величины отношения площади к массе [5].

С расширением процесса освоения ОКП усиливается его загрязнение, вступая в противоречие с его освоением. В 1993 г. был создан комитет IADC — Межагентский координационный комитет по проблеме техногенного загрязнения околоземного космического пространства. Задачей Комитета является всестороннее изучение проблемы техногенного мусора и выработка мер противодействия этому процессу.

Космический мусор образуется на всех этапах полета КА. Это — все выполнившие вспомогательную функцию элементы, верхние ступени ракет-носителей, последствия намеренных или самопроизвольных взрывов КА и РН, столкновений с КО и др. Самый опасный источник образования КО — столкновения. Средняя относительная скорость столкновений в космосе — 10 км/с, что приводит к образованию огромного количества мелкого КМ. С 1961 г. взрывы и столкновения в космосе случались примерно четыре раза в год [2]. В 2006 и 2007 гг. наблюдался всплеск взрывов, многие из которых можно объяснить только столкновением уже с фрагментами КМ.

Разрабатывается много вариантов утилизации космического мусора, но радикальных решений пока нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует констатировать, что появление нового типа небесных объектов искусственного происхождения создало специфическую область астро-

номии, которая является промежуточной между метеорной и планетной астрономией [3]. Космические объекты постоянно минимизируются: микроспутники (кубсаты) имеют слабую яркость, что значительно усложняет проблему поиска малоразмерных объектов. Астрономы обнаруживают, наблюдают, определяют природу новых небесных объектов, каталогизируют их, т. е. выполняют полный цикл астрономических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Козлов С. И., Сильников М. В. Воздействие космической техники на окружающую среду // ГЕОС. — 2016. — С. 521—575.
2. Вениаминов С. С. Космический мусор — угроза человечеству // Ин-т космич. исследований РАН. Сер. Механика, управление, информатика. — Москва, 2013. — С. 70—97.
3. Микиша А. М., Рыклова Л. В., Смирнов М. А. Загрязнение космоса // Вестн. Российской акад. наук. — 2001. — 71, № 1. — С. 26—31.
4. Смит Д. Е., Коленкевич Р., Дан П. Дж. Геодезические исследования и лазерная локация спутников // Использование искусственных спутников для геодезии. — М.: Мир, 1976. — С. 265—281.
5. Bakhtigaraev N., Levkina P., Rykhlova L., Sergeev A., Kokhirova G., Chazov V., et al. Features of geosynchronous space objects motion near 75°E // Open Astron. — 2018. — 27, N 1. — P. 139—143.
6. Orbital Debris Quarterly News // Publ. NASA Orbital Debris Program Office. — 2018. — 22, N 1. — P. 11. — URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i1.pdf>
7. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., et al. First GOCE gravity field models derived by three different approaches // J. Geod. — 2011. — N 85. — P. 819—843.

Статья поступила в редакцию 15.06.18

REFERENCES

1. Adushkin V. V., Kozlov S. I., Sil'nikov M. V. Vozdeystviye kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu sredyu. GEOS, 521—575 (Moscow, 2016) [in Russian].
2. Veniaminov S. S. Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu. IKI RAS, Ser. Mekhanika, upravleniye, informatika, 70—97 (Moscow, 2013) [in Russian].
3. Mikisha A. M., Rykhlova L. V., Smirnov M. A. Zagryazneniye kosmosa. Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk, 71 (1), 26—31 (2001) [in Russian].
4. Smith D. E., Kolenkiewicz R., Dunn P. J. Geodetic Studies by Laser Ranging to Satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, 265—281 (Moscow, 1976).
5. Bakhtigaraev N., Levkina P., Rykhlova L., Sergeev A., Kokhirova G., Chazov V., et al. Features of geosynchro-

- nousspace objects motion near 75E. *Open Astronomy*, **27**(1), 139—143 (2018).
6. Orbital Debris Quarterly News. *A publication of the NASA Orbital Debris Program Office*, **22**(1), P. 11 (2018). <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i1.pdf>
7. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., et al. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *J. Geod.*, N 85, 819—843 (2011).

Received 15.06.18

Л. В. Рыхлова

Інститут астрономії Російської академії наук,
Москва, Росія

ЗЕМЛЯ ТА НАВКОЛОЗЕМНИЙ ПРОСТІР: ДОСЛІДЖЕННЯ, ВІДКРИТТЯ, ПРОБЛЕМИ

За 60 років, що пройшли з моменту запуску першого штучного супутника Землі, дослідження космосу перетворилося в одну з найдинамічніших і плідних областей науки, що розвивається в багатьох напрямках — від космічної геодезії та зондування Землі з космосу, до вивчення Всесвіту по всьому спектру електромагнітних хвиль. Космічна промисловість стала невід'ємною частиною світової економіки. Однак одночасно з'явилася і стала швидко наростати популяція техногенних об'єктів — космічного сміття, що з'являється на всіх етапах польоту. Спостереження, вивчення і прогнозування космічного сміття стали новим напрямком астрономії.

Ключові слова: навколоземна астрономія, навколоземний простір, космічне сміття, оптичні спостереження.

L. V. Rykhlova

Institute of Astronomy of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

EARTH AND THE NEAR SPACE: RESEARCH, DISCOVERIES AND PROBLEMS

60 years have passed since the launch of the first artificial Earth satellite. During this time the space research has

turned into one of the most dynamic and fruitful areas of science, developing in numerous fields — from the study of the atmosphere, space geodesy and Earth remote sensing to the study of the Universe in the whole spectrum of electromagnetic waves. In the article, the attention is paid to the emerging possibility of using the observations of satellites as targets for the studies of the Earth: its shape and gravitational field, the definition of fundamental astrometric and geodesic constants, determination and study of parameters of the Earth's rotation. The necessity of reviewing the principles and methods of construction of basic reference frames has emerged. We briefly summed up the main stages of high-precision determinations of parameters of the Earth's gravitational field with the help of the specialized satellites, as well as an effect of deviations of the Earth from the uniformly rotating solid body on the satellite orbits, changes in the speed of the Earth's rotation. Satellites provide direct and accurate measurements of the Earth's flattening, data of its internal structure, terrestrial tides, and plate tectonics. The new problem has arisen, which is related to the intensive exploration of the near-Earth space. More than 50 countries participate in its exploration. The space industry has become an integral part of the world economy. The number of satellite launches for various purposes is now approaching 6000. Parts of launch vehicles, defunct satellites and their disintegration create the growing amount of space debris in the near-Earth space, which already poses a threat to space exploration. In this connection, the new research field arises in astronomy — the observation of the technogenic space debris, studying its distribution over the altitudes of orbits, its density at various altitudes, determination of its sizes, velocity and direction of its movement. All this leads to the development of methods and means of space debris removal from the near-Earth space to continue the space exploration.

Keywords: near-Earth astronomy, near-Earth space, space debris, optical observations.

І. Ф. Чайка

м. Лютецька, Полтавської обл., Україна

ОЛЕКСАНДР ЗАСЯДЬКО: МІСЯЧНИЙ СЛІД УКРАЇНСЬКИХ КОЗАЦЬКИХ РАКЕТ

До 240-річчя від дня народження

У статті подано коротку біографію видатного конструктора бойових ракет, генерала артилерії Олександра Засядька (народився 20 листопада 1779 р. у м. Лютецька Полтавської обл., помер 8 червня 1837 р. у м. Харків), якого по праву можна вважати засновником української сучасної ракетної зброї. Основну увагу приділено історії винаходів бойових порохових ракет (запалювальних та фугасних) та створенню пускових установок для запуску нової зброї. Згадуються праці, як наукові, так і популярні, присвячені його життю та діяльності, та обговорюються можливі державні заходи зі святкування 240-річчя від дня народження О. Д. Засядька, зокрема проведення міжнародної конференції на його батьківщині у Полтаві. Іменем О. Д. Засядька названо кратер на зворотному боці Місяця (кратер Zasyadko).

Ключові слова: бойові ракети, видатні конструктори — Олександр Засядько.

Його ім'я викарбуване на карті Місяця. Звичайне українське прізвище Засядько — поруч з іменами таких світових світил науки, як Коперник, Галілей, Ньютон, Ейнштейн... За які заслуги так високо до самісіньких небес піднесла його світова наукова спільнота? І чому ж тоді на Землі не звели йому бодай найскромнішого пам'ятника?

Олександр Дмитрович Засядько народився 7(20) листопада 1779 року у містечку Лютецька Галицького повіту на Полтавщині в сім'ї головного гармаша Запорізької Січі — Дмитра Даниловича Засядька, який очолював артилерію Січі за Петра Калнишевського, з яким родичався (був його хрещеником). Його прадіди були козаками: прапрадід Яків Засядько 1659 р. став лубенським

полковником, дід Данило і прадід Лук'ян були лютецькими сотниками. Після розгрому Січі Дмитро Засядько отримав дворянський чин, і з дозволу цариці у серпні 1790 р. відправив двох своїх синів до інженерного кадетського корпусу у Петербург.

Таким чином, юний Олександр Засядько у вісімнадцять років по закінченню навчання в Артилерійському й інженерному шляхетському корпусі став офіцером.

Доля розпорядилася так, що наступні п'ятнадцять років йому довелося не полишати поля бою. Він брав участь у італійському і швейцарському походах О. Суворова. Двадцятирічним юнаком Засядько був серед восьмисот артилеристів експедиційного корпусу, який поспішав через Альпи рятувати царів. Не раз Олександрові доводилося брати участь у рукопашних боях, тричі під



Рис. 1. Олександр Дмитрович Засядько (1779—1838) — видатний конструктор ракетної зброї

ним убивало коня, двічі кулі пробивали ківер. За ці п'ятнадцять бойових літ йому двічі довелося воювати з французами і турками в Італії, Швейцарії, на Балканах і в Адріатичному морі. Служив під командуванням М. Кутузова. Війну з Наполеоном командиром артилерійської бригади Олександр Засядько пройшов від Москви до Парижа і Лейпцига. Шпага за хоробрість, чин полковника, шість бойових орденів і слава хороброго воїна — такий підсумок його бойового шляху в тридцять п'ять років (рис. 1), на які припали участь у італійському поході О. Суворова в 1799 р., російсько-турецька війна 1806—1812 рр., російсько-французька війна 1812 р., війни і заграничні походи російської армії 1813—1814 рр. [3].

Ще у період бойових походів О. Д. Засядька все більше непокоїли думки про необхідність модернізації артилерії. Остаточного укріпився у цих думках він тоді, коли з'явилася можливість перепочити після війни і краще осмислити бойовий досвід, успіхи і поразки. Саме вони навели його на ідею створення ракетної зброї. «Я воїн, і всі мої думки спрямовані на прославлення нашої зброї. Якби у нас була ракетна зброя раніше, хто знає, чи посмів би Бонапарт ступити на нашу землю. А якщо ж і почав своє варварське нашествя, то, можливо, його зупинили б раніше. І тоді сиділо б з нами багато сміливців, полеглих на полі бою» — говорив Засядько. Подавши у відставку, Олександр Дмитрович повернувся у

рідну Лютеньку, щоб зайнятися дослідями у пошуках нової зброї, хоча мав можливість продовжити службу.

У 1815 році, щоб мати кошти на прожиток і дослідницьку роботу, продав батьківський маєток під Одесою, а вдома у Лютеньці спорудив кузню й лабораторію та запросив до себе спеціалістів. Працюючи над винаходом по двадцять годин на добу, Засядько не жалів себе. І наполеглива праця згодом увінчалася успіхом: неподалік містечка Лютенька злетіла вгору вогняна ракета, а потім ще і ще. Недоброзичливці нарікали, що якийсь дивакуватий офіцер заповзвся «спалити губернію», але той не звертав на них уваги. До нашого часу передалися спогади, що тодішні мешканці звернулися до керівника Гадяцького повіту, що «цей офіцер якимось трубками цілить у копиці сіна, а ті безперервно горять». Той запитав: «А у чій копиці сіна він цілить?». «У своїй», — кажуть. «То хай палить», — була відповідь...» Засядько наполегливо шукав ефективну рецептуру пороху, визначав оптимальну товщину стінок снаряда, навчався точно запускати ракети в ціль. Так два століття тому на просторах піщаних вигонах від Лютеньки до Великих Сорочинців народжувалася теорія ракетної тяги — галузь науки, якої ще не знала наша країна, як і вперше створених та випробуваних керованих бойових ракет.

У 1817 році Олександр Засядько сконструював кілька типів бойових порохових ракет, запалювальних та гранатних (фугасних). Вони були різних калібрів, перші їхні зразки під Лютенською пролітали відстань до 2300 м.

Великим успіхом винахідника стало створення пускових установок для запуску нової зброї. Це були легкі «триноги-козли», які міг переносити вільно на своїх плечах один солдат. А згодом ним були сконструйовані пускові установки залпового вогню, які зі спеціальної триноги могли одночасно чи поодиночки запускати шість ракет. Це був прообраз майбутніх «Катюш» і «Градів» — реактивних систем залпового вогню. Окрім запалювальних і гранатних ракет винахідник сконструював ще й сигнальні ракети, які під час запуску вночі можна було розглядати на відстані до 40 верст. Перші зразки бойових ракет були здатні досить точно влучати у мішені, що

знаходилися на відстані до чотирьох кілометрів. Згодом О. Д. Засядько знаходить і пристрій для наведення цієї зброї (рис. 2). Підсумки своїх дворічних експериментів (1816—1817 рр.) в Лютенці вчений виклав у праці «Про справу ракет запалювальних і фугасних», яку написав 1817 року. Вона стала першим посібником із виготовлення та бойового застосування ракетної зброї для тогочасного війська.

Так, 200 років тому (1815—1818) поблизу полтавського містечка Лютенька розпочався відлік історії українського ракетобудування, і його основоположником став козацький нащадок, видатний конструктор О. Д. Засядько.

Вболіваючи за долю свого дітища, аби його винахід був запроваджений у виробництво, Засядько пише рапорт до царя з описом своєї зброї, не вимагаючи за це винагороди. Кажуть, що імператор, дізнавшись про таку подію, вигукнув: «Слава Богу! Є ще офіцери, які служать ради честі!». Навесні 1818 року Олександр Засядько з великим обозом вирушає з Лютеньки до Санкт-Петербурга. Під час показових випробувань в артилерійському полігоні біля Петербургу кращі зразки ракет Засядька пролетіли на відстань 2888 сажнів (понад 6 км). Ніде в світі такої зброї у той час не існувало (тогочасні англійські ракети Конгрива пролітали відстань до 2700 м).

Згодом винахід ракетника високо оцінили та присвоїли йому звання генерал-майора. Імпера-

торським наказом призначили очолити новостворене вище артилерійське училище, Петербурзький арсенал, піротехнічну лабораторію й Охтинський пороховий завод. Знання Засядька з фізики, хімії, механіки і математики були ґрунтовними, підкріплювала їх величезна бойова практика, а невтомність і цілеспрямованість допомагали успішно виконувати організаційні справи і вдосконалювати винаходи своєї зброї. Стрімкий політ пошуків на початку XIX століття привів Засядька до ідеї польоту на Місяць, зокрема на ракеті. Він підрахував, скільки пороху потрібно для цього, і зрозумів, що надто слабе це паливо для такого польоту. Винахідник наполегливо вів пошуки потужнішого палива, і вони привели його до досліджень нафтопродуктів, але вивчити їх не встиг.

У 1826 році Засядька призначають начальником штабу російської артилерії. Це була пора, коли у повітрі знову запахло порохом: назрівала нова війна з турками. Він спішно налагоджує серійне виробництво ракетної зброї: за його планами щороку мали випускатися шість тисяч ракет. Це були такі складні пристрої, що виготовляти їх на одному заводі було неможливо, тому замовлення розподілялись по всій імперії. Сировину й деталі виготовляли окремі державні та приватні заводи. Остаточне ж складання виконували на спеціальному ракетному підприємстві.

Вже на початку 1828 року Засядько підписує наказ про створення у військах постійної ракет-

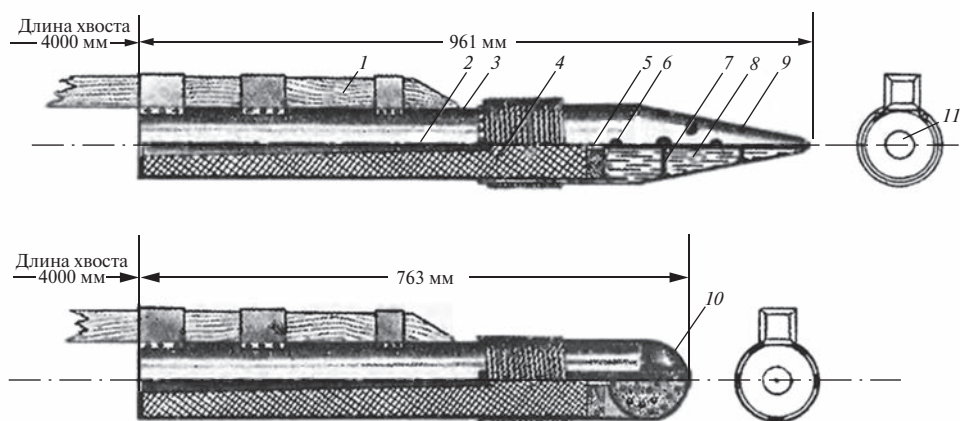


Рис. 2. Схематичне зображення бойових ракет О. Д. Засядька. Фото зі статті Н. Кочерги «Козацький нащадок О. Д. Засядько як засновник ракетного роду військ у Російській імперії (перша половина XIX століття)» (веб-сайт Б. Тристанова «Історія Полтави»)



Рис. 3. Поштова марка, присвячена Олександрові Дмитровичу Засядьку (2003 р.)

ної роти, оснащеної шеститрубними станками для запуску ракет. Рота складалася з 23 осіб командирів і понад 300 рядових ракетників. На облогу фортеці Браїлов з початку війни рота взяла більше трьох тисяч ракет. Перед самим штурмом Засядько за тиждень особисто навчив ще 23 роти ракетників. Вони у день штурму по фортеці на світанку здійснили перший залп фугасними, а другий — запалювальними ракетами, сіючи паніку серед ворогів. За чотири дні гарнізон Браїлова капітулював. Тепер для російської армії відкривався шлях через Дунай, а тут біля українського міста на Поділлі могутня зброя Засядька пройшла перше бойове хрещення. Потім його ракетні роти долали опір фортець Варни, Сілістрії, Ахалциха, Шумли та інших рубежів. З боку моря ракетами Засядька турецькі гарнізони вражали Дунайська та Чорноморська флотилії, навіть у горах Кавказу злітала його нездоланна зброя у війні з турками. Ракети всюди наближали перемогу у російсько-турецькій війні 1828—1829 рр.

Після війни стан здоров'я генерал-лейтенанта Засядька різко погіршився, і Олександр Дмитрович подав у відставку. Він знову повернувся в Україну і останні роки проживав у Харкові, але і тут неспокійний розум винахідника прагнув нових відкриттів. Аби налагодити медичне обслуговування простого люду, він виношує ідею додаткової медичної освіти священників, щоб вони лікували і душу, і тіло людини. А ще генерал прагнув придумати таку машину, яка б проводила кораблі через Дніпровські пороги. Та під час поїздки на Хортицю його хвороба загострилася, і 27 травня 1838 р. серце винахідника зупинилося.

Поховали його, як і заповідав, у Курязькому монастирі під Харковом. На жаль, могила не вціліла до наших днів.

Через козацьке походження Засядька, якого він старався ніколи не приховувати, а навпаки — гордився ним, його ім'я у радянські часи згадувалося лише в енциклопедіях (наприклад [2]). В 1979 році у видавництві «Молодь» вийшла з друку російською мовою книга харківського робітника-ливарника Юрія Нікітіна (зараз — відомого російського письменника) під назвою «Шпага Олександра Засядька». Проте ідеологічний відділ ЦК Компартії України заборонив її продаж. Заборону було накладено тільки через те, що її літературний герой був сином головного гармаша Запорізької Січі. Автор книги був підданий гонінням і близько семи років не брав участі в літературному житті. І лише щасливий збіг обставин дозволив книзі пізніше, у 2007 р., побачити світ [6].

Після проголошення незалежності України крига забуття О. Д. Засядька почала скресати [1, 12, 13]. Спочатку у 2003 р. вийшли у світ поштовий конверт і марка (рис. 3), присвячені генерал-лейтенанту артилерії О. Д. Засядьку, а у 2004 р. на батьківщині Олександра Дмитровича з'явилася його меморіальна дошка. У Полтавському музеї авіації та космонавтики, заснованому у 1987 р. з ініціативи творця ракетних двигунів академіка В. П. Глушка, діє експозиція¹, де зібрано тематичні матеріали про життя і діяльність О. Д. Засядька [8, 9]. У 2003 р. в науково-енциклопедичному виданні «Імена України в космосі» була опублікована стаття В. С. Кислюка «Олександр Засядько» [4], присвячена конструктору перших вітчизняних ракетних установок, на честь якого названо один із кратерів на зворотному боці Місяця [14]. Пізніше з'явилися матеріали в засобах масової інформації [5, 7, 10, 11], а у 2006 р. на Симпозіумі Міжнародної академії астронавтики доповідалася праця, де висвітленовнесокпершопрохідцівракетно-космічної техніки О. Засядька (1779—1837), К. Константинова (1818—1871), М. Кибальчича (1853—1881), Ю. Кондратюка (О. Шаргея) (1897—1942), чії біографії пов'язані з Україною [15].

Кратер «Zasyadko» знаходиться у центрі 95-кілометрового кратера «Babcock» біля північно-східного краю Моря Сміта (рис. 4), його діаметр —

¹ <http://pspace.pe.hu/ii-%D0%B7%D0%B0%D0%BB/>

10 км, селенографічні координати центра — 3.96° пн. ш., 94.19° сх. д., має метеоритне походження. Кратер знаходиться біля краю зворотного боку Місяця і завдяки лібрації його іноді видно з Землі. Назва кратера була затверджена Міжнародним астрономічним союзом у 1976 році [16]. Кратер практично не піддався руйнуванню, і має циркулярну чашеподібну форму з невеликою ділянкою плаского дна. Вал чітко окреслено, внутрішній схил валу гладкий. Висота валу над навколишньою місцевістю досягає 410 м, обсяг кратера становить приблизно 50 куб. км. На рис. 5 подано фотографії кратера «Zasyadko», виконані відповідно астронавтами з КК «Аполлон-16» (1972) та за допомогою КК «Аполлон-11» (1969).

Згідно з Постановою Верховної Ради України від 26 грудня 2008 р. вперше на державному рівні відзначили ювілей славетного ракетника. «20 листопада 2009 р. в Українському домі у м. Києві з ініціативи Національної спілки краєзнавців України, Національної академії наук України, Всеукраїнської організації «За Помісну Україну» та громадської організації «Славетні імена Полтавщини» відбулися урочистості з нагоди 230-річчя від дня народження Олександра Дмитровича Засядька — славетного українця, видатного інженера, винахідника, воєначальника, автора першої у світі порохової ракети. За дорученням президента НАН України Є. Б. Патона відкрив та вів урочистості академік-секретар відділення історії, філософії і права НАН України, генеральний директор Національної бібліотеки ім. Вернадського НАН України, академік НАН України О. С. Онищенко. Він оголосив привітання учасникам ювілейного зібрання від Прем'єр-міністра України Юлії Тимошенко. Розповіли про видатного українця та нинішню ситуацію у космічній галузі України голова Полтавської обласної державної адміністрації Валерій Асадчев; директор загальноосвітньої школи з села Лютенька Гадяцького району Полтавської області, де народився і проводив свої піротехнічні дослідження О. Д. Засядько, — Іван Чайка; голова Національної спілки краєзнавців України, академік НАН України, Герой України Петро Тронько; заступник генерального директора Національного космічного агентства України Еду-

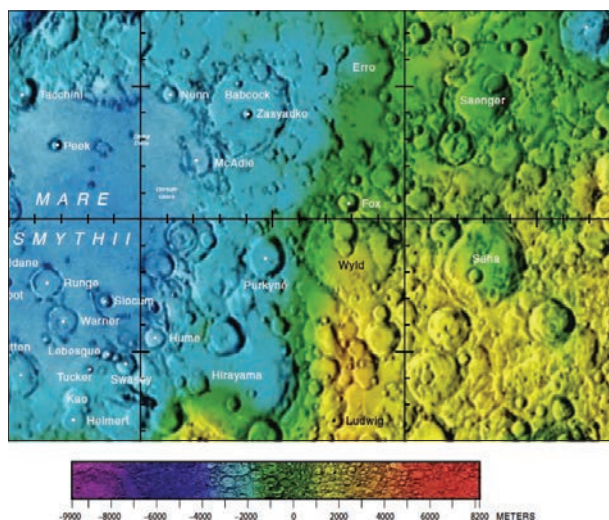
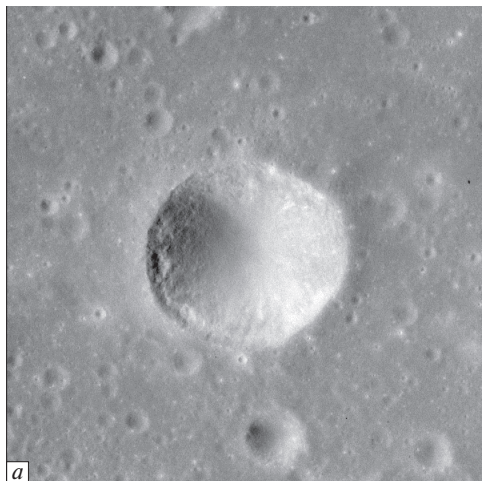
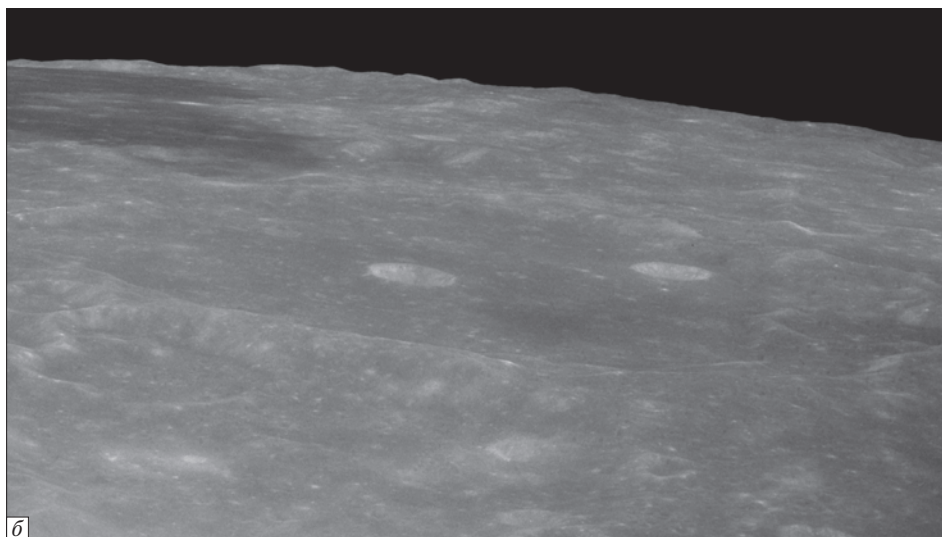


Рис. 4. Околиці кратера «Zasyadko» (фрагмент карти зворотного боку Місяця https://planetarynames.wr.usgs.gov/images/moon_np.pdf)

ард Кузнецов; командувач ракетних військ і артилерії — начальник Управління ракетних військ і артилерії Командування Сухопутних військ Збройних сил України, генерал-майор Андрій Колесніков; заслужений творець космічної техніки Російської Федерації, генерал-лейтенант, академік, учасник космічних програм на Міжнародному космодромі «Байконур», професор Московського державного технічного університету ім. М. Баумана, фундатор Полтавського земляцтва у Москві Анатолій Руденко; голова правління Українського фонду культури, академік НАН України, Герой України, почесний голова ГО «Полтавське земляцтво у м. Києві» Борис Олійник; директор Українського інституту національної пам'яті, академік НАН України Ігор Юхновський; директор Головної астрономічної обсерваторії НАН України, академік НАН України Ярослав Яцків; директор Полтавського державного краєзнавчого музею Катерина Фесик та директор Житомирського музею космонавтики імені С. П. Корольова Ольга Копил. Голова громадської організації «Славетні імена Полтавщини» Валентина Асадчева представила учасникам Урочистостей книгу «Славетні імена Полтавщини. Олександр Засядько», видану напередодні ювілею Полтавським видавництвом «Оріяна». Для учасників зібрання був організо-



а



б

Рис. 5. Фото кратера «Zasyadko» на зворотному боці Місяця, отримані: *а* — астронавтами з КК «Аполлон-16» у 1972 р. (великий кратер у центрі; фрагмент оригінального знімка, повернений північчю догори, з корекцією рівнів яскравості і збільшенням контрастності, див. <http://www.lpi.usra.edu/resources/apollo/frame/?AS16-M-2731>); *б* — астронавтами з КК «Аполлон-11» у 1969 р. (кратер у центрі (світлий колір), темна область ліворуч — Море Сміта (див. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Babcock_crater_AS11-41-6012.jpg?uselan))

ваний прем'єрний показ документального фільму режисера Полтавського обласного телебачення Володимира Дряпака «Павло Попович: життя земне і космічне». З великим інтересом вони також ознайомились з експозицією виставки «Україна космічна» із колекції проекту Петра Ющенка «Українці в світі» та фондів Полтавського державного краєзнавчого музею, яку провів працівник проекту Анатолій Кветной. Кожному учаснику заходу краєзнавці вручили каталог виставки, де представлено 59 портретів українців, пов'язаних з розвитком космічної галузі. Особливу піднесену ауру урочистостям з нагоди ювілею О. Засядька створив заслужений академічний симфонічний оркестр Національної радіокомпанії України, яким диригував його ке-

рівник, заслужений діяч мистецтв України уродженець Полтавщини Володимир Шейко» [Урочистості з нагоди 230-річчя від дня народження Олександра Засядька // Краєзнавство. — 2009. — № 3–4. — С. 290].

Нещодавно, готуючись до 240-ї річниці з дня народження О. Д. Засядька, батьківщину ракетного генерала відвідала поважна делегація Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» імені М. К. Янгеля». Науковці підприємства були приємно вражені тим, як дбайливо оберігають пам'ять про свого видатного земляка у його рідному селі Лютенька. У шкільному краєзнавчому музеї зібрано достатньо матеріалів для створення сучасного музейного закладу, який міг би надавати послуги найвибагливішим ту-

ристам і делегаціям. Для музею О. Д. Засядька вже виділено приміщення старої школи, яке є архітектурною пам'яткою; зібрано картини, портрети, документальні матеріали, що розповідають про бойовий і творчий шлях винахідника, його козацьке коріння, матеріали про розвиток українського ракетобудування і його визначних діячів.

Гості з «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» подарували для майбутнього музею макет сучасної ракети «Зеніт-3SL», книги, фотоматеріали про «Південмаш», ювілейні буклети видатних конструкторів М. К. Янгеля, В. Ф. Уткіна, С. М. Конюхова, картину «Місто Дніпро — космічна столиця України» та інші документи. В кінці зустрічі начальник інформаційного відділення, помічник Генерального конструктора В. Д. Ткаченко сказав: «До сьогодні Україна мала свою ракетно-космічну столицю — місто Дніпро, тепер ми переконалися, що вона має і батьківський дім». Цим батьківським домом О. Е. Кашанов, заступник Генерального директора «КБ «Південне», назвав Лютеньку — батьківщину О. Д. Засядька. Гості запевнили, що вони допоможуть методично наповнити майбутній музей конструктора перших вітчизняних ракет О. Д. Засядька, накреслили плани проведення в Лютенці міжнародної конференції з питань освоєння космосу в 2019 р. під час відзначення ювілейної дати винахідника. Науковці відзначили, що такий музейний заклад буде знаковим не тільки для туристичної галузі, аерокосмічної освіти і патріотичного виховання молоді, а й для піднесення іміджу України — однієї з провідних космічних держав світу.

О. Д. Засядько народився у краї, що його Леся Українка назвала «найукраїннішою Україною», як писала вона про гетьманську столицю і Гадяччину. Тут до сьогодні зберігаються звичаї та обряди язичницької і козацької культури. До наших днів у Лютенці на Трійцю відзначають свято Віхи, ставлять високі уквітчані жердини, що здіймаються до неба. «Що вища віха, то ближче до Бога» — у цьому символі свята земляків Засядька з давніх-давен відобразилося одвічне прагнення людини до Космосу. Лютенька — одне з найбільших і найдревніших сіл Полтавщини. Тут спочиває прах Івана Брюховецького — одного з українських гетьманів. У період української революції це містечко стало центром антибільшо-

вицького повстання на півночі Полтавщини, за що було спалене дотла червоними карателями. У 1932 р. на Лютеньку чекала нова розправа. Серед шести сіл України більшовицьким урядом Косіора її було занесено на республіканську чорну дошку, що привело до загибелі від голоду і репресій майже чотирьох тисяч жителів. Не випадково Герой України академік НАН України Ігор Юхновський у книзі «Славетні імена Полтавщини. Олександр Засядько» у 2009 році записав: «... ім'я видатного інженера-артилериста Засядька, як і імена інших видатних українців минулого, складають теперішню і майбутню славу України. Відомі в усьому світі, вони мають бути достойно пошановані перш за все на рідній землі. Пам'ять про них і їхні справи ми повинні дбайливо зберігати і передавати наступним поколінням. Достойні діяння теперішніх нащадків у свою чергу збагачуватимуть Україну». Тому є надія, що Верховна Рада України допоможе відзначити на високому державному рівні 240-річчя від дня народження засновника української сучасної ракетної зброї — генерала О. Д. Засядька — і сприятиме фінансовій підтримці в облаштуванні батьківського дому ракетно-космічної галузі, адже саме звідси 200 років тому почався відлік українського ракетобудування.

Автор висловлює подяку І. Б. Вавиловій за корисні зауваження та доповнення до цієї статті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абліцов В. Галактика «Україна». Українська діаспора: видатні постаті. — К.: КИТ, 2007. — 436 с.
2. Засядко Александр Дмитриевич. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров, 3-е изд. — М.: Сов. энциклопедия, 1969—1978.
3. Заторицкий Н. М. Засядко Александр Дмитриевич. Русский биографический словарь: в 25 томах. — СПб.—М., 1896—1918.
4. Кислюк В. С. Олександр Засядько // Імена України в космосі / Під ред. І. Б. Вавилової, В. П. Плачинди. — Львів: ВД «НАУТІЛУС», 2003; К.: Компанія «ВАІТЕ», 2001, 2003; К.: ВД «Академперіодика», 2003. — С. 190—191.
5. Кочерга Н. Козацький нащадок О. Д. Засядько як засновник ракетного роду військ у Російській імперії. — URL: <https://Histpol.pl.ua>

6. Нікітін Ю. Золота шпага. — М.: ЕКСМО, 2007. — 448 с.
7. Ніконов В. П. Рождение ракетного оружия. — URL: <http://www.space.com.ua/gateway/news.nsf/0/0DD2EDA65BFD7D54C2256FDA0047A388>
8. Пістолєнко І. О. Засядько О. Д. // Альманах пошани й визнання Полтавщини: 100 видатних особистостей Полтавщини минулих століть. — Полтава: Артполіграфсервіс, 2003. — 205 с.
9. Пістолєнко І. О. О. Д. Засядько — воїн, винахідник, людина // Проблеми історії України XIX — початку XX ст. — 2006. — Вип. 11. — С. 298—306. — URL: http://resource.history.org.ua/publ/xix_2006_11_298
10. Ракетных дел мастер. URL: <https://focus.ua/news/2005/>
11. Рожєн О. Українці на Землі і на небі // Дзеркало тижня. — 2006. — № 51.
12. Чухліб Т. Творець ракетної зброї генерал Засядько // Патріот Батьківщини. — 1991. — № 10. — С. 3—4.
13. Чухліб Т. Перший український винахідник ракетної зброї // Борисфен. — 1992. — № 12. — С. 22—24.
14. Andersson L. E., Whitaker E. A. NASA Catalogue of Lunar Nomenclature // NASA Ref. Publ. — 1982. — N 1097. — 184 p.
15. Ventskovsky O., Vavilova I., Yatskiv Ya. They blazed the trail for the space pioneers (On some little-known Ukrainian names in the history of Astronautics and rocketry) // AAS History Ser. — 2012. — 37. — P. 88—96. — (History of Rocketry and Astronautics: Proc. 40 History Symposium IAA, Valencia, Spain, 2006 / Ed. M. Freeman).
16. Zasyadko. Gazetteer of Planetary Nomenclature (en). International Astronomical Union (IAU) Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN). 2010-10-18.

Стаття надійшла до редакції 13.03.18

REFERENCES

1. Ablitsov V. Galaxy "Ukraine". Ukrainian Diaspora: Outstanding Persons. — K.: KIT, 2007. — 436 pp. (2007) [in Ukrainian].
2. Zasyadko Alexander Dmitrievich. The Great Soviet Encyclopedia: [in 30 t.], Ch. Ed. A. M. Prokhorov, 3rd ed. M.: Soviet Encyclopedia, 1969—1978 [in Russian].
3. Ztvornitsky N. M. Zasyadko Alexander Dmitrievich. Russian Biographical Dictionary: 25 volumes. St. Petersburg, Moscow, 1896—1918 [in Russian].
4. Kislyuk V. S. Olexander Zasyadko. In the book: "The Names of Ukraine in Space", scientific and encyclopedic edition, Eds. I. B. Vavilova, V. P. Plachynda. — Lviv: Publishing House "NAUTILUS", 2003; K.: Company VAITE, 2001; K.: Publishing House "Academiperiodyka", P. 190—191 (2003) [in Ukrainian].
5. Kocherha N. Kozatsky's descendant O. D. Zasyadko as the founder of a rocket type of troops in the Russian Empire. <https://Histpol.pl.ua> [in Ukrainian].

6. Nikitin Yu. Golden sword. M.: EKSMO (2007) [in Russian].
7. Nikonov V. P. The Birth of Missile Weapons. Aerospace portal of Ukraine: www.space.com.ua [in Russian].
8. Pistolenko I.O. Zasyadko O.D. In: Almanacs of respect and recognition of Poltava region: 100 outstanding personalities of Poltava region of the past centuries. — Poltava: ArtPligraphservice, 2003 [in Ukrainian].
9. Pistolenko I. O. O. D. Zasyadko Warrior. Inventor. Personality. In: "Problems of the History of Ukraine of the XIX — early XX centuries.", Eds. O. P. Reent, V. J. Borisenko, V. M. Volkovinsky, et al. — K.: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of History of Ukraine. No. XI, pp. 298—306 (2006) [in Ukrainian].
10. Rocket Affairs Master. <https://focus.ua/news/2005/> [in Russian].
11. Rozhen O. Ukrainians on Earth and in the sky. *Zerkalo nedeli*, No. 51 (2006) [in Ukrainian].
12. Chukhlib T. Creator of missile weapons General Zasyadko. *Patriot Bat'kivschyny*. No. 10, P. 3—4 (1991) [in Ukrainian].
13. Chukhlib T. The first Ukrainian inventor of missile weapons. *Borisfen* / No. 12, P. 22—24 (1992) [in Ukrainian].
14. Andersson L. E., Whitaker E. A. NASA Catalogue of Lunar Nomenclature. NASA RP-1097 (1982).
15. Ventskovsky O., Vavilova I., Yatskiv Ya. They blazed the trail for the space pioneers (On some little-known Ukrainian names in the history of Astronautics and rocketry). In: History of Rocketry and Astronautics, Proceedings of 40 History Symposium IAA, Valencia, Spain, 2006. Ed. M. Freeman. AAS History Series, Vol. 37, P. 88—96 (2012).
16. Zasyadko. Gazetteer of Planetary Nomenclature (en). International Astronomical Union (IAU) Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN). 2010-10-18.

Received 13.03.18

І. Ф. Чайка

м. Лютецька, Полтавська обл., Україна

АЛЕКСАНДР ЗАСЯДЬКО: ЛУННЫЙ СЛЕД УКРАИНСКИХ КОЗАЦКИХ РАКЕТ До 240-летия со дня рождения

В статье дана краткая биография выдающегося конструктора боевых ракет, генерала артиллерии Александра Засядько (родился 20 ноября 1779 г. в г. Лютецька Полтавской обл., умер 8 июня 1837 г. в г. Харькове), которого по праву можно считать основателем украинского современного ракетного оружия. Основное внимание уделено истории изобретений боевых пороховых ракет (зажигательных и фугасных) и созданию пусковых установок для запуска нового оружия. Упоминаются работы, как научные, так и популярные, посвященные его жизни

и деятельности, а также обсуждаются возможные государственные мероприятия по празднованию 240-летия со дня рождения А. Д. Засядько, в частности, проведение международной конференции на его родине в Полтаве. Именем А. Д. Засядько назван кратер на обратной стороне Луны (кратер Zasyadko).

Ключевые слова: боевые ракеты, выдающиеся конструкторы — Александр Засядько.

I. F. Chayka

Lyutenka, Poltava region, Ukraine

ALEXANDER ZASYADKO. THE LUNAR TRACK OF THE UKRAINIAN COSSACK ROCKETS

The article contains a brief biography of Olexander Zasyadko (November 20, 1779, Lyutenka town of the Poltava region — June 8, 1837, Kharkiv), the outstanding designer of the combat missiles, the general of artillery, which can rightfully be considered the founder of Ukrainian modern rocket weapons. The main attention is paid to the history of his inventions of fire powder guns (incendiary and explosive) and the creation of launcher devices for these weapons. Zasyadko's bravery was famed in legends. The officer (he started as a lieutenant) was awarded a golden sword for courage, the title of colonel, and a number of war decorations. Throughout this period of his life, he continued to dream of the military rocket's creation. Still serving in the artillery, he commenced designing rockets only

in 1815, when the 1812—1815 war came to its end. Using his own money, he equipped a laboratory in his Lyutenka village, where he did all the major work on building the rockets, as well as a projector for them. "Zasyadko was a talented inventor. He not only created a new rocket system and elaborated a theory of rocket propulsion, but he also matured tactics of military use of the weapons invented by him. He designed launching systems which allowed the execution of a volley fire by six rockets simultaneously. He dreamt of rocket flights to the Moon, and even made the necessary calculations of the required gunpowder, which was not (he understood it) the best fuel for this purpose" (Ventskovsky et al., 2013). Zasyadko's military rockets were successfully used for the siege of the Turkish fortresses during the Russian-Turkish war of 1828—1829. Zasyadko was personally in charge of all the siege artillery. When the war finished, he got the title of lieutenant-general, and retired from military service in 1834 and come back to Ukraine. His pioneering inventions stimulated further development of rocket building and afterwards played an important role in the creation of rockets. We mention papers and books, both scientific and advertising, which are devoted to his life and activities, as well as we announce possible events devoted to the celebration of the 240th anniversary of the birth of O. D. Zasyadko, in particular, holding an international conference at his native land in Poltava. The crater on the far side of the Moon (crater Zasyadko) is named in his honor.

Keywords: military rocket, personality — O. D. Zasyadko.



Книга **«Місія — Космос»** — емоційно насичена розповідь першого космонавта нашої держави, Героя України, кандидата технічних наук, народного депутата України четвертого скликання, Народного посла України, космонавта-випробувача, військового льотчика-випробувача 1-го класу, інженера-випробувача, генерал-майора Збройних Сил України Леоніда Костянтиновича Каденюка про політ у космос у 1997 році у складі екіпажу космічного корабля «Колумбія», місія STS-87. Видання містить надзвичайно цікаві описи етапів польоту, портрети його учасників і роздуми автора про Всесвіт, місце в ньому планети Земля та відповідальність людини за її майбутнє.

ISBN 978-617-7393-48-0

Від автора

Ця книга є своєрідним звітом-розповіддю про надзвичайну подорож за межі земної гравітації у безкрайні простори Космосу та невагомості. Все, що я там побачив, відчув і з чим зіткнувся, видалося зовсім іншим, але надзвичайно дивним, неповторним світом. Хоча насправді так і було.

До написання книги у мене було відчуття незавершеності виконаної місії в космосі. Тому вона є логічною і своєрідною крапкою не лише у здійсненні космічної мрії, а й стала підсумком тривалого, надзвичайно цікавого періоду мого життя.

Рішення написати книгу зумовлене і палким бажанням поділитися унікальною інформацією, отриманою впродовж: перебування на космічній орбіті, і глибоким усвідомленням обов'язку це зробити. Адже якщо мені судилося побувати в космосі, безперечно, було б неправильно тримати цю інформацію в собі. Крім того, якомога детальніше описуючи побачене, відчуте й пережите, я намагався не лише дати цінну інформацію тим, хто проймається космічними проблемами та досліджує психологію людини в космічному польоті, але й «підняти» в космос самого читача — особливо того, у кого ця мрія не здійснилась.

Нарешті, космічна місія дала змогу глибше зрозуміти й оцінити земні проблеми людського суспільства. Політ значно наблизив мене до розуміння того, що поява у Всесвіті такої планети як Земля, не випадкова, що вона, як і

сам Всесвіт, в якому з моменту виникнення існує беззаперечний порядок, є наслідком діяльності Розуму.

Космос — не безкінечна порожнеча, як здається на перший погляд. Він переповнений унікальною інформацією, численною кількістю питань та відповідей на них. Щоб все це пізнати та усвідомити, необхідні знання в найрізноманітніших областях науки. Тому з чим більшою кількістю і різноманітністю знань людина летить у космос, тим більше з неї користі як космонавта, тим цікавіше їй самій.

Феномен Землі як особливої планети у Всесвіті, її унікальність і витончена краса аж ніяк не сумісні з військовою діяльністю людини. І саме там, на земній орбіті, особливо гостро усвідомлюєш безглуздість людських зусиль, які можуть зруйнувати цю красу неймовірними витратами на створення, розміщення, збереження і використання ядерної, хімічної, бактеріологічної зброї та інших видів самознищення людини, існування військових блоків як формувань одних груп держав проти інших. Усе це сприймається злочином людини проти себе, проти життя на Землі.

Саме там, у космосі, приходить гостре розуміння того, що людина як носій інтелекту не тільки змушена, а й зобов'язана відчувати величезну відповідальність за збереження біосфери нашої планети і всього живого на ній. І в цьому одне з її призначень. Лише в такому випадку вона буде достойна свого високого звання — Людина.

Шлях до «мого» космосу був тривалий. Дякую долі, що протягом цих років був зайнятий надзвичайно цікавою ро-

ботою серед унікальних, легендарних і одержимих людей — космонавтів і льотчиків-випробувачів. Життя та праця з ними стали обов'язковою передумовою здійснення моєї мрії. І я вдячний їм за це.

Досить часто мене запитують, чи важко стати космонавтом? Звичайно, важко, — відповідаю я. Але якщо цю мрію зміг втілити в життя хлопчик з буковинського села, то так само вона може бути здійснена й будь-ким.

Працюючи над книгою, я вперше зіткнувся з пошуком слів для описання позаземних відчуттів і того, що бачив за межами космічного корабля, — Землю і Космос. Я не знайшов таких слів. І не повинен був знайти — їх просто нема.

Мені дуже хочеться, щоб той, хто прочитає книгу, сам немовби побував в космосі. Я також: буду радий, якщо читач, на мить відклавши книгу, замислиться над своїм буттям на планеті Земля, відчує відповідальність за неї і все ній живе.

ПІСЛЯМОВА

Отже, космічний політ відбувся. Я щасливий від того, що опинився серед небагатьох, кому вдалося доторкнутися до таємниць Всесвіту, розгадувати які людство буде ще довго, і побачити нашу чудо-планету збоку.

Неймовірні космічні враження неминуче вплинули на сприйняття земної дійсності й примусили по-особливому, крізь призму побаченого, відчутного й пережитого в космосі сприйняти проблеми людського суспільства, з почуттям відповідальності й турботи ставитись до навколишнього світу. Легендарний першопроходець космосу В. О. Шаталов так сказав про космонавтів, які повертаються з космосу: «Це чудові люди вже на старті, але коли вони повертаються... Можливо, ви не повірите, але космос володіє своєю таємничою силою і владою над психікою. Ми не знаємо, як все це відбувається, але звідти до нас повертаються нові люди, зовсім інші, більш відверті, відповідальні, компанійські, альтруїсти. У цілому космос робить їх ще кращими».

Якось болісно й гірко відкрилася недосконалість людського суспільства та законів його буття. На жаль, людина ще не усвідомила свою природну відповідальність за планету, на якій живе, — такий гнітючий висновок також став неминучим наслідком вражень від космічного польоту навколо нашої чудо-планети Землі.

Хотів би вкотре наголосити на найнаболілішому: створення все досконаліших і страшніших

видів озброєння як знаряддя знищення людини і навколишнього середовища, об'єднання держав у військові блоки як воєнних угруповань одних проти інших — це неймовірно безглуздя на планеті Земля потрібно якомога швидше припинити. Людина має негайно змінити концепцію існування на своїй планеті. Основа земного буття полягає в тому, що життя має продовжувати життя, еволютивно удосконалюючи його, а не самознищуватися. Цивілізаційність людського суспільства як природний поступ еволюційного розвитку, інтелект, дарований людині природою, повинні бути спрямовані на збереження біосфери нашої планети як середовища, завдяки якому й існує життя на унікальній у Всесвіті планеті Земля. Ці прості та ясні істини особливо гостро усвідомлюються, коли спостерігаєш Землю з космосу.

Життя тривало... Надзвичайною подією для України стало вперше відвідання її американськими астронавтами — членами екіпажу місії STS-87. Я очікував цього історичного факту з нетерпінням та особливим піднесенням. К. Крігел і Т. Дої з дружинами та К. Чавла з чоловіком у період з 14 по 20 вересня 1998 року побували в Києві, Дніпропетровську, Чернівцях і моєму селі Клішківці.

Україна високо оцінила заслуги членів екіпажу у здійсненні спільного космічного польоту представниками США, України і Японії. У Марійському палаці Президент України Л. Кучма вручив їм ордени нашої держави. Згідно з Указом Президента від 19 червня 1998 року: «За значний особистий вклад у розвиток космонавтики, зміцнення міжнародної співпраці в області космічних досліджень» К. Крігел нагороджений орденом «За мужність» III ступеня, а С. Ліндзі, У. Скотт, К. Чавла і Т. Дої орденами «За заслуги» III ступеня.

Під час перебування астронавтів у Верховній Раді України я зачитав вітальне звернення екіпажу до депутатів і передав українському парламенту прапор і Конституцію нашої держави, які побували в космосі, вручивши їх спікеру парламенту Олександру Ткаченку, а також сертифікати з підписами членів екіпажу, засвідчуючими, що ці державні символи з 19 листопада по 5 грудня 1997 року здійснили 251 виток навколо Землі на борту БТКК «Колумбія».

Знаменитий лікар і академік М. Касьян з Полтавщини нагородив учасників космічного польоту



Американець К. Крігел, японець Т. Дої, індіанка К. Чавла та українець Л. Каденюк з мамою Л. Каденюка на порозі батьківської домівки



З Папою Римським Іоанном Павлом II

місії STS-87 вищою відзнакою Міжнародного фонду свого імені — орденом Миколи Чудотворця «За визначний вклад у примноження добра на Землі».

Знаменною подією Буковини стало відвідання астронавтами міжнародного екіпажу її столиці — міста Чернівців, а також села Клішківці. Незабутньою і зворушливою була зустріч підкорювачів космосу моїми земляками під час нашого переїзду з Чернівців у Клішківці. Вздовж дороги в усіх селах, які ми проїжджали, стояли буковинці, гаряче вітаючи астронавтів і свого земляка-космонавта. Такої дійсно історичної події Буковина ще не знала. І чи знатиме ще коли-небудь?

Під час численних зустрічей з людьми я переконався, наскільки їм цікава тема космосу і, звичай-

но, людина, яка в ньому побувала. Відразу з приємністю звернув увагу, що космічною тематикою однаково захоплюються і школярі зі студентами, й поважні вчені, й бабусі з дідусями в українських містах і селах.

Якось відбулася подія, яка, незважаючи на швидкоплинність, стала особливою і знаковою для мене, — зустріч із Папою Римським Іоанном Павлом II у Марійському палаці під час його перебування в Україні влітку 2001 року. Очікуючи в черзі державних осіб, які представлялися Папі Римському, я з неабиякою увагою і відвертим захопленням спостерігав за ним. Для мене він був вкрай цікавий як видатна особистість сучасності — духовний лідер католиків нашої планети, обраний на Апостольський престол ще в 1978 році. На його обличчі відображалися мудрість і доброта. Вісімдесятидворічний Понтифік, стомлений поїздом і особливою до себе увагою, добросовісно виконував обов'язок, дещо відсторонено думаючи про щось своє.

Черга просувалася доволі швидко. Кожен підходив до високого гостя і, привітавшись за руку, проходив далі. Коли дійшла моя черга, наш Президент, який сидів поруч із високим гостем, промовив: «А це наш космонавт». Раптом обличчя Папи просвітлішало, стало життєрадісним, немовби його втома кудись відразу ділася. Він миттєво пожвавішав, енергійно підняв на мене очі, які раптом стали випромінювати захоплення, відверту цікавість і ще щось те, що постійно бачу в очах людей, з якими зустрічаюсь. Затримавши мою руку у своїй теплій долоні і уважно дивлячись прямо в очі, гарною українською мовою Понтифік промовив: «Мені дуже приємно бачити космонавта. А як там у космосі?».

Я був у край вражений цим простим запитанням, а найбільше тим, що Папа Римський промовив його саме так, як тисячі пересічних громадян. Чомусь саме від цього він здався мені ще більш значущим. Відверто кажучи, такого я не очікував і, розуміючи, що часу на обширну відповідь немає, спромігся лише відповісти: «Дуже гарно і вкрай цікаво». Уважним, захопленим, проникливим поглядом, немовби намагаючись знайти щось особливе, Папа Римський вдивлявся в мене, тримаючи мою руку в своїй і таким чином нама-

гаючись затримати біля себе. Я це зрозумів і мені захотілося ще щось сказати про космос. Але, на жаль, обставини вимагали дотримання процедури зустрічі. Тому, продовжуючи дивитися мені в очі і ще раз потиснувши руку, Понтифік відпустив її, провівши добрим, виразним поглядом.

Таке сприйняття Папою Римським мене як космонавта назавжди *залишилось* у пам'яті високим світлим спогадом, по-особливому підкреслило неабияку значущість для землян професії «космонавт».

Створивши технічні засоби для подолання земного тяжіння, людина вже ніколи не відмовиться від підкорення Всесвіту. Проникнення в його безкрайні глибини не лише через природну цікавість — що ж там далі, а й з метою пошуків інших цивілізацій, планет, придатних для життя, буде безкінечним, як сам Всесвіт. Це потребує розробки принципово інших технічних систем, які забезпечать необхідне переміщення в космічному просторі. Адже ті, що використовуються нині й принцип роботи яких побудований на використанні реактивної сили, мають обмежені можливості й не забезпечують необхідної швидкості руху. Для подолання неймовірних відстаней космічного простору неабиякі можливості відкриваються з використанням природних сил та джерел енергії, які мають гравітаційне чи електромагнітне походження і домінують у Всесвіті. Крім того, використання багатовимірної геометрії космічного простору, уміння знайти «вхід» в інші просторові системи дадуть можливість перетворити фантастику в реальність. І людина зможе не лише керувати швидкістю зміни свого місцезнаходження у Всесвіті, а й переходити з одного часового виміру в інший. Саме універсальність і простота природи прояву гравітації, на мій погляд, і є причиною того, що для нас вона залишається загадкою. Можливо, такі думки — фантастика, але вони підказані самим Космосом.

Я переконаний, що ми, українці, будемо достойно й далі підкорювати Всесвіт. До освоєння космосу ми причетні від самого початку проникнення в нього людини і зробили для цього вагомий внесок — і теоретичний, і практичний. Варто згадати видатні імена українців — теоретиків і практиків космічної справи: Олександра Засядька (в деяких



Зустріч з керівниками КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля (м. Дніпро)



Зустріч у КПІ. Зліва направо: Л. Каденюк, В. Жолобов, О. Леонов, Б. Патон, М. Згуровський

джерелах — Засядька), Миколу Кибальчича, Юрія Кондратюка (О. Шаргея), Сергія Корольова, Валентина Глушка, Гліба Лозино-Лозинського, Михайла Янгеля, Володимира Челомея, першого українця-космонавта Павла Поповича. Цей ряд обов'язково буде поповнюватися новими й новими іменами.

Україна успадкувала майже третину ракетно-космічного промислового і наукового потенціалу, створеного за роки існування Радянського Союзу. Одним із заходів, спрямованих на формування та розвиток космічної галузі України, стало створення в 1992 році Національного космічного агентства України (НКАУ), перейменованого 9 грудня 2010 року на Державне космічне агент-

ство України (ДКАУ). До сфери управління космічного відомства увійшло понад 30 конструкторських бюро, промислових підприємств, військових частин, наукових установ та формувань.

Україна являється членом міжнародних організацій, координуючих космічну діяльність: Комітету ООН з мирного дослідження космосу (COPUOS), Всесвітнього комітету з космічних досліджень (COSPAR), Всесвітньої організації по супутниковим дослідженням Землі (CEOS), Міжнародної організації астронавтики (IAE). НКАУ підписало двосторонні угоди з космічними агентствами і відомствами Євросоюзу, США, Китаю, Індії, Казахстану, Росії, Туреччини, Ізраїля, Бразилії.

Сучасна Україна входить до складу космічних держав світу завдяки здійсненню власних космічних проектів, активній участі у міжнародній космічній діяльності, високому рівню науково-технічного та виробничого потенціалу. Космічна галузь в Україні визначена пріоритетною, її продукція успішно конкурує на світовому космічному ринку товарів і послуг. Нині чотири космічні ракетні комплекси української розробки та виробництва («Зеніт-2», «Зеніт-3SL», «Зеніт-3SLБ» та «Дніпро») забезпечують запуски космічних апаратів з космодромів різних країн, удосконалюється «Циклон-4», розробляються ракети-носії «Маяк» та інші.

Пріоритетами практичного та наукового напрямів української космонавтики є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), розвиток досліджень, які відповідають сучасному світовому рівню, передбачають міжнародне співробітництво, забезпечують розроблення унікальних приладів і методик та об'єднують науковий і ракетно-космічний потенціали України. Зокрема, передбачається широкий спектр досліджень з фундаментальних та прикладних проблем, пов'язаних із походженням і еволюцією Сонячної системи, Землі, вивчення сонячно-земних зв'язків, а також впливу їх на біосферу, довкілля і техногенну ситуацію в атмосфері й на поверхні Землі.

Важливою передумовою успішного космічного майбутнього України стало створення в 1991 році Українського молодіжного аерокосмічного об'єднання (УМАКО) «Сузір'я», основним завданням якого є збереження зв'язків між поколіннями тих, хто розвивав авіацію та розпочинав практичне освоєння космосу і хто продовжить цю вкрай важливу для держави й світу справу.

Засновником УМАКО «Сузір'я» був двічі Герой Соціалістичної Праці генеральний директор, головний конструктор конструкторського бюро (КБ) «Південне» (1971—1991 рр.) Володимир Уткін. Почесним президентом об'єднання було обрано Леоніда Кучму — генерального директора «Південмашу» (1986—1992 рр.), Президента України (1994—2005 рр.). Серед членів правління УМАКО «Сузір'я» Герой України Юрій Алексєєв — генеральний директор заводу «Південмаш» (1992—2005 рр.), генеральний директор НКАУ (2005—2009 рр.), Голова Державного космічного агентства України (ДКАУ) (2010—2014 рр.), Герой України Станіслав Конюхов — генеральний конструктор-генеральний директор ДКБ «Південне» (1991—2010 рр.), Герой України Володимир Команов — головний конструктор ракетно-космічного напрямку (1985—1996 рр.), заступник генерального конструктора ДКБ «Південне» по програмі «Морський старт» — директор програми (1996—2003 рр.), Герой України Леонід Каденюк — перший космонавт України. Від самого початку створення УМАКО «Сузір'я» Головою правління був призначений народний депутат України 3-го та 4-го скликань, почесний працівник ракетно-космічної галузі нашої держави Олег Петров. Таке поважне представництво членів правління об'єднання свідчить щодо піклування про майбутнє космічної і авіаційної галузей України з боку її видатних діячів і слугує гарантією успішного розвитку. Я переконаний, що саме серед «сузір'ївців» виховуються майбутні інженери, конструктори і космонавти, які впевнено продовжать підкорення Всесвіту, прославляючи Україну як космічну державу.

АСНІС Юхим Аркадійович — завідувач відділу космічних технологій Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — космічне матеріалознавство та зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

БУЛАВІН Ілля Володимирович — науковий співробітник відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — клітинна біологія рослин, космічна біологія.

БУЛАЦЕВ Олександр Ратмірович — завідувач групи Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрямок науки — зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

ВОЛОСОВ Віктор Вікторович — провідний науковий співробітник відділу управління динамічними системами Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — механіка і процеси управління: методи теорії стійкості, методи управління динамічними системами в умовах невизначеності та їхнє застосування до синтезу управління рухом космічних апаратів.

ВОРОБІЙОВА Тамара Василівна — провідний інженер відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрямок науки — клітинна біологія рослин, космічна біологія.

ЖУПАНОВ Іван Вікторович — молодший науковий співробітник відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України.

Напрямок науки — клітинна біологія рослин, космічна біологія.

КЛИМЕНКО Олена Миколаївна — науковий співробітник відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — клітинна біологія рослин, космічна біологія.

КОЛОТІЙ Андрій Всеволодович — старший науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системне адміністрування, мережеві технології, математичне моделювання, GRID-обчислення, прогнозування врожайності.

КОРДЮМ Єлизавета Львівна — завідувач відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, доктор біологічних наук.

Напрямок науки — клітинна біологія на ембріології рослин, космічна біологія.

КРЮКОВ Валерій Анатолійович — провідний інженер Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрямок науки — зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

ЛАВРЕНЮК Микола Сергійович — молодший науковий співробітник відділу наук про мікрогравітацію Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України. Аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі, нейромережевий підхід до картографування земної поверхні з використанням супутникових зображень, тематична обробка супутникових зображень.

ЛІКАРЕНКО Тарас Олександрович — молодший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрямок науки — зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

ЛОБАНОВ Леонід Михайлович — заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, керівник відділу, академік-секретар відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України, доктор технічних наук, професор, академік НАН України. Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат премії Ради Мі-

ністрів СРСР, Державної премії України в галузі науки і техніки, премії ім. Є. О. Патона. Нагороджений орденами «Знак Пошани», орденом «За заслуги» III ступеня, медалями Ю. В. Кондратюка за участь в космічній діяльності, медаллю НАН України «За наукові досягнення».

Напрямок науки — дослідження поведінки матеріалів при зварюванні, розвиток теорії зварювальних напружень і деформацій, розробка методів дослідження і регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань, створення високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробка методів і засобів їхньої діагностики, оцінки та продовження ресурсу.

НЕДІЛЬКО Олександр Миколайович — провідний науковий співробітник Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, кандидат технічних наук, доцент. ORCID ID 0000-0001-8080-0486

Напрямок науки — аеродинаміка літальних апаратів.

РИХЛОВА Лідія Василівна — завідувач науково-дослідної групи відділу досліджень Сонячної системи Інституту астрономії Російської академії наук, головний науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, геодинаміка, малі тіла Сонячної системи.

РЮЛАНД Ерік — науковий співробітник факультету природничих наук і технологій Інституту екології та наук про навколишнє середовище, Університету Парижа Ест-Кретьє, викладач, кандидат біологічних наук (доктор філософії).

Напрямок науки — ліпідний сигналінг рослин.

САФРОНОВ Олександр Васильович — старший науковий співробітник Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України. ORCID ID 0000-0001-7420-0062

Напрямок науки — аеродинаміка літальних апаратів.

СЕМОН Богдан Йосипович — професор Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України. ORCID ID 0000-0002-7449-8214

Напрямок науки — аеродинаміка літальних апаратів.

ТЕРНОВИЙ Євген Георгійович — заступник завідувача відділу космічних технологій Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрямок науки — зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — директор Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, завідувач відділу наук про мі-

крогравітацію, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук. Автор понад 60 наукових праць та двох монографій.

Напрямок науки — космічне матеріалознавство, ріст кристалів, системне дослідження космічної діяльності, планування космічних експериментів.

ЧАЙКА Іван Феодосійович — у 1980—2011 рр. директор Лютенської загальноосвітньої школи I—III ступенів ім. М. Л. Величая. Зараз на волонтерських засадах працює над створенням музею О. Д. Засядька в містечку Лютецьки Полтавської області. Почесний краєзнавець України.

Напрямок науки — краєзнавство.

ШЕВЧЕНКО Володимир Миколайович — старший науковий співробітник відділу управління динамічними системами Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — системний аналіз і теорія оптимальних рішень.

ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович — професор кафедри інформаційної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор, доктор технічних наук. Провідний науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутникових даних, інформаційні технології, Grid-обчислення, розробка розподілених систем.

ШУЛИМ Віктор Федорович — науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Напрямок науки — зварювальні і споріднені технології в космічних умовах.

ЯЙЛИМОВ Богдан Ялкупович — науковий співробітник відділу інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — побудова карт земного покриву, аналіз та обробка геопросторових даних, класифікація супутникових даних, дистанційне зондування, злиття даних, ГИС.

ЯЙЛИМОВА Ганна Олексіївна — аспірантка факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — системний аналіз, дослідження операцій, аналіз даних, різномісність, прийняття рішень, інформаційні технології, аналіз та обробка геопросторових даних, дистанційне зондування.