

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

3

3MICT

Космічні енергетика і двигуни

Тимошенко В. И., Галинский В. П. Математическое моделирование процессов аэрогазотермодинамики сверхзвукового летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем

Космічна й атмосферна фізика

Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Ногач Р. Т., Чорногор Л. Ф., Назарчук З. Т., Мельник М. О., Каліта Б. І., Харченко Б. С., Романишин І. М., Лозинський А. Б., Русин Б. П., Каратаєва Л. М., Любінецький З. І., Альохіна Л. В., Ліпський В. К. Штучна акустична модифікація навколоземного середовища 19 Шувалов В. А., Симанов В. Г., Хорольский П. Г., Кулагин С. Н. О торможении искусственно «намагниченного» космического аппарата в ионосферной плазме 59 Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Широтная зависимость квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7-9 сентября 2017 года 72 Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень Поляков Г. А., Матус Г. В., Ільїна С. М., Фесен-

CONTENTS

Space Energy, Power and Propulsion

Space and Atmospheric Physics

Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Cherno- gor L. F., Nazarchuk Z. T., Melnyk M. O., Kalita B. I., Kharchenko B. C., Romanyshyn I. M., Lozynskyi A. B., Rusyn B. P., Karatayeva L. M., Lyubinetsky Z. I., Alyohi- na L. V., Lipsky V. K. Artificial acoustic modification of the near-earth environment	19
Shuvalov V. A., Simanov V. G., Horolsky P. G., Kula- gin S. N. Deceleration of an artificially magnetized spacecraft in the ionospheric plasma	59
<i>Chernogor L. F., Shevelev M. B.</i> Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7–9, 2017	72
Social Sciences in Space Exploration	
<i>Polyakov H., Matus G., Ilyina S., Fesenko E.</i> The results of the trial exploitation of the «Error classifier in design	

Polyakov H., Matus G., Ilyina S., Fesenko E. The results of the trial exploitation of the «Error classifier in design documentation» during the procedure of standards compliance monitoring of design documentation **84**

Історія космічних досліджень		History of Space Research	
До 70-річчя від дня народження доктора фізико- математичних наук професора ЧОРНОГОРА Лео- ніда Феоктистовича	93	To the 70 th birthday of Professor Leonid Chernogor	93
Професор Єлизавета Кордюм — член Зали Слави Міжнародної астронавтичної федерації	95	Professor Elyzaveta Kordyum at the Hall of Fame Award of the International Astronautical Federation	95

На першій сторінці обкладинки — Поле ізоліній температури при взаємодії вихлопного струменя продуктів згоряння зі збуреним потоком навколо корпуса літального апарата (див. статтю *В. І. Тимошенка, В. П. Галінського*, С. 3—18).

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

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. Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р., Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

Підписано до друку 10.03.2020. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 10,08. Обл.-вид. арк. 10,58. Тираж 101 прим. Зам. № 5950.

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.

Космічні енергетика і двигуни

Space Energy, Power and Propulsion

https://doi.org/10.15407/knit2020.02.003 УДК 533.6.011

В. И. ТИМОШЕНКО

зав. отделом, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. ГАЛИНСКИЙ

старш. науч. сотруд., канд. физ.-мат. наук, старш. науч. сотруд.

Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины ул. Лешко-Попеля 15, Днипро, Украина, 49005 E-mail: itm12@ukr.net, E-mail: office.itm@nas.gov.ua

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АЭРОГАЗОТЕРМОДИНАМИКИ СВЕРХЗВУКОВОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРЯМОТОЧНЫМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Обсуждаются основные вопросы разработки расчетно-методического обеспечения для проведения оперативных комплексных расчетов термогазодинамических процессов в элементах прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД), интегрированного с корпусом летательного аппарата (ЛА), маршевыми методами. Численное моделирование течения в ПВРД разбивается на такие составляющие — обтекание корпуса ЛА, течение в воздухозаборном устройстве (B3V), камере сгорания и сопле с выхлопной струей. Расчет сверхзвукового течения около корпуса аппарата, во входной части B3V и в выхлопной струе осуществляется в невязком приближении с использованием схемы Годунова или с учетом вязкости с использованием модели «вязкого слоя». Области дозвукового течения в выходной части B3Y и дозвукового неравновесного течения в камере сгорания рассчитываются с использованием модели «узкого канала» или в квазиодномерном приближении. Обсуждаются вопросы подбора геометрических параметров камеры сгорания и околокритической части выходного сопла в случае задания параметров потока на выходе из B3Y. Проведен анализ различных моделей воспламенения и горения керосина в камере сгорания. Расчет течения в выхлопной струе осуществляется с учетом обтекания нижней хвостовой части поверхности ЛА и взаимодействия струи с возмущенным набегающим потоком. Представлены результаты оценочных расчетов в двумерном приближении отдельных элементов и полной компоновки ЛА стилизованной формы.

Ключевые слова: оперативный численный расчет, термогазодинамические процессы, прямоточный воздушно-реактивный двигатель, летательный annapam, воздухозаборное устройство, камера сгорания, сопло, выхлопная струя, горение керосина, маршевые методы расчета.

введение

Характерной особенностью летательного аппарата (ЛА), использующего в качестве силовой установки прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД), является высокая степень интеграции планера и силовой установкой. Инженерные методики оптимизации параметров ПВРД для обеспечения заданного режима маршевого полёта, предложенные в работах [1—3], используются при проведении оценочных расчетов. При численном моделировании процессов аэрогазодинамики ЛА с ПВРД необходимо

Цитування: Тимошенко В. И., Галинский В. П. Математическое моделирование процессов аэрогазотермодинамики сверхзвукового летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2 (123). С. 3–18. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.003

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

решать совместно целый комплекс задач [14, 16]. В частности, в работе [14] обсуждаются основные аспекты формулировки комплексных математических моделей для расчета аэрогазодинамических параметров гиперзвукового ЛА (ГЛА) интегральной схемы. В работах [4, 5, 8, 13, 15, 17] рассматривались вопросы моделирования термогазодинамических процессов в отдельных элементах ПВРД. Подходы к организации рабочего процесса и формированию проточной части камеры сгорания ПВРД обсуждаются в работах [4, 8, 10]. Там же рассмотрены способы сжатия, воспламенения, стабилизации пламени и горения топлива в потоке с целью сокращения длины камеры сгорания.

Целью исследования является комплексный анализ аэро- и термогазодинамических процессов, сопровождающих обтекание ЛА с ПВРД сверхзвуковым набегающим потоком, позволяющий согласованно учитывать как обтекание корпуса ЛА, так термогазодинамические процессы во всех элементах ПВРД. Будут рассмотрены вопросы оперативного расчета маршевыми методами аэро- и термогазодинамических процессов, сопровождающих функционирование ЛА с ПВРД. При этом используется комплексный анализ этих процессов, позволяющий численно моделировать термогазодинамические процессы во всех элементах ПВРД в рамках используемых математических моделей, без каких-либо априорных допущений.

Перечень основных задач, которые необходимо рассматривать при численном моделировании термогазодинамических процессов для ЛА с ПВРД, сводится к следующему:

а) внешнее обтекание корпуса ГЛА;

б) течение воздуха в ВЗУ;

в) течение продуктов сгорания в камере сгорания;

г) истечение продуктов сгорания через сопло;

 д) взаимодействие выхлопной струи продуктов сгорания с корпусом ЛА и набегающим потоком воздуха.

Для численного моделирования термогазодинамических процессов в элементах ПВРД используются различные системы уравнений и способы их решения. Расчет сверхзвукового течения около боковой поверхности корпуса ЛА, на входе в канал ВЗУ, в расширяющейся части сопла Лаваля и выхлопной струе может осуществляться с использованием уравнений Эйлера или «вязкого» слоя. Для расчета дозвукового течения в канале ВЗУ и камере сгорания ПВРД может использоваться квазиодномерная модель или модель «узкого канал». Более детальное описание используемых расчетных моделей и алгоритмов их реализации в двумерном приближении приводится ниже.

ОСНОВНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ. ЭЛЕМЕНТЫ МАРШЕВОГО АЛГОРИТМА

Система уравнений «вязкого» слоя для сверхзвуковых течений. Систему уравнений «вязкого» слоя, используемую для описания сверхзвукового течения в элементах ПВРД: входной участок канала ВЗУ, расширяющийся участок выходного сопла и выхлопная струя, можно записать в системе координат Оху в следующем виде [14]:

• первая подсистема (уравнения переноса продольного импульса, полной энтальпии и массовых концентраций компонентов газовой смеси) —

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{y^{\nu}} \frac{\partial}{\partial y} \left(y^{\nu} \mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} , \quad (1)$$

$$\rho U \frac{\partial H_0}{\partial x} + \rho V \frac{\partial H_0}{\partial y} = \frac{1}{y^{\nu}} \frac{\partial}{\partial y} \left[y^{\nu} \left(\frac{\mu}{\Pr} \right)_t \frac{\partial H_0}{\partial y} \right] - \frac{1}{y^{\nu}} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y^{\nu} \left[\left(\frac{1}{\Pr} - 1 \right) \mu \right]_t U \frac{\partial U}{\partial y} \right\}, \quad (2)$$

$$\rho U \frac{\partial X_k}{\partial x} + \rho V \frac{\partial X_k}{\partial y} = \frac{1}{y^{\nu}} \frac{\partial}{\partial y} \left[y^{\nu} \left(\frac{\mu}{Sm_k} \right)_t \frac{\partial X_k}{\partial y} \right] + W_k,$$

$$(k = 1, 2, ..., N);$$
 (3)

• вторая подсистема (уравнения неразрывности и поперечного импульса без учета вязкости) —

$$\frac{\partial y^{\nu} \rho U}{\partial x} + \frac{\partial y^{\nu} \rho V}{\partial y} = 0, \qquad (4)$$

$$\rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y}, \qquad (5)$$

где U, V — проекции вектора скорости вдоль осей x, y системы координат (ось x направлена вдоль корпуса аппарата); ρ , P и X_k — плотность, статическое давление, полная энтальпия и массовые концентрации компонентов газовой смеси;

$$H_0 = h + (U^2 + V^2) / 2, \ h = \sum_{k=1}^N X_k(P, T) h_k(T)$$

— полная и удельная энтальпии, *N* — количество компонентов в газовой смеси,

$$h_k = \int_{T^*}^{T} C_{P_k} dT + h_k^2$$

— статическая энтальпия k-го компонента смеси, μ — эффективный коэффициент динамической вязкости; Pr, Sm — турбулентные числа Прандтля и Шмидта; W_k — скорость изменение концентраций смеси вследствие неравновесных химических реакций; $\nu = 0$ или 1 — для декартовой или цилиндрической системы координат соответственно.

Система уравнений (1)—(5) дополняется уравнением состояния

$$P = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rho h , \text{ или } P = \frac{R_0}{m} \rho T , \qquad (6)$$
$$\frac{1}{m} = \sum_{k=1}^{N} \frac{X_k}{m_k} ,$$

где m — молекулярная масса газовой смеси, R_0 — универсальная газовая постоянная.

Алгоритм расчета химического состава газовой смеси. При решении уравнений 2-го порядка переноса компонентов газовой смеси (3) вследствие «жесткости» уравнений диффузии при протекании химических реакций в основу алгоритма численного расчета на одном шаге по маршевой переменной положен метод расщепления по физическим процессам [7, 12]. Согласно данному методу решение полной задачи на одном шаге интегрирования по маршевой переменной сводится к последовательному определению изменения массового состава смеси в сечении x_{n+1} сначала только в результате химического взаимодействия, а затем изменения компонентного

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

состава смеси в сечении x_{n+1} вследствие конвективного и диффузионного переноса.

На первом шаге используется система уравнений вида

$$\frac{dX_k}{d\tau} = W_k \text{ или } U \frac{dX_k}{dx} = W_k , \qquad (7)$$
$$(k = 1, 2, \dots, N).$$

Уравнения (7) решаются с использованием алгоритма Гира [19]. Для химических реакций

$$v_A A + v_B B \leftrightarrow v_D D + v_C C$$

скорость изменения концентрации *k*-го компонента определяется соотношением

$$W_k = \sum_{i=1}^N m_k \mathbf{v}_{ki} \dot{\mathbf{\omega}}_i \,.$$

Здесь $\dot{\omega}_A = k'_A \cdot n_A^{\nu_A} \cdot n_B^{\nu_B}$ — скорость образования компонента в конкретной реакции, $k'_j = A'T^s \exp(-E/R_0T)$ — константа скорости *j*-й химической реакции, $n_k = \rho X_k / m_k$ — мольно-объемная концентрация *k*-го компонента [12].

На втором этапе в результате численного решения уравнений (3) без учета химических реакций ($W_k = 0$) определяется изменение компонентного состава смеси в сечении x_{n+1} вследствие конвективного и диффузионного переноса компонентов.

Модель «узкого канала» для дозвуковых течений. В результате торможения сверхзвукового потока в выходном участке канала ВЗУ и в камере сгорания ПВРД течение становится дозвуковым. В областях течения с обширными дозвуковыми зонами для решения уравнений «вязкого слоя» обычно используются алгоритмы метода установления. Это приводит к большим затратам машинного времени и затрудняет использование приближения «вязкого слоя» в оценочных проектных расчетах.

В каналах с плавным изменением площади поперечного сечения, к которым во многих случаях можно отнести выходные участки ВЗУ и камеры сгорания ПВРД, можно принять, что изменения давления поперек сечения канала намного меньше изменений давления вдоль канала, и можно предполагать dP/dy = 0. Это допущение позволяет исключить уравнение (5) из рассмотрения и использовать уравнение нераз-

рывности (4) для определения поперечного компонента скорости. Для определения остальных параметров дозвукового течения воздуха в ВЗУ и продуктов сгорания в камере сгорания используются уравнения для продольной составляющей вектора скорости, полной энтальпии, концентрации компонентов и уравнение первого порядка — уравнение неразрывности. Это приближение представляет собой модель «узкого канала» [9, 11]. Продольный градиент давления dP/dx в модели «узкого канала» является неизвестной функцией продольной координаты х. В общем случае величина dP/dx определяется с учетом краевого характера граничных условий для поперечной скорости V_n, которая вычисляется из уравнения первого порядка — уравнения неразрывности. В двумерном случае для определения *dP/dx* можно использовать интегральный аналог уравнения неразрывности, согласно которому расход газа в любом поперечном сечении канала равен расходу газа G_{in} во входном сечении канала.

Уравнение неразрывности и уравнение количества движения, входящее в систему уравнений «узкого канала», в нормированных координатах записываются в виде

$$\frac{\partial y^{\nu}(S-B)\rho U}{\partial x} + \frac{\partial y^{\nu}\rho V_n}{\partial \eta} = 0,$$

$$a_x \frac{\partial u}{\partial x} + b_y \frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{1}{(S-B)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_U \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) + \frac{\alpha_U}{y^{\nu}} \frac{\partial u}{\partial \eta} - (S-B) \frac{dp}{dx},$$

где

$$a_{x} = (S - B)\rho U , \ b_{y} = \rho V_{n}, \ \alpha_{U} = \mu ,$$
$$V_{n} = V - U(B'_{x} + \eta(S'_{x} - B'_{x})), \ \eta = \frac{y - B(x)}{S(x) - B(x)}$$

— нормированная поперечная координата.

В конечноразностном виде с явным выделением слагаемого dP/dx уравнение количества движения переписывается в виде

$$A_{j}U_{j+1} + B_{j}U_{j} + C_{j}U_{j+1} = -\frac{a_{j}^{n-1}}{\Delta x}U_{j}^{n-1} - (S - B)\frac{dP}{dx}.$$
(8)

Представив решение уравнения (8) в виде

$$U_j = U_j^0 + U_j^p \frac{dP}{dx}$$

для вычисления U_j^0 и U_j^p получим следующие системы уравнений:

$$A_{j}U_{j+1}^{0} + B_{j}U_{j}^{0} + C_{j}U_{j-1}^{0} = -\frac{a_{j}^{n-1}}{\Delta x}U_{j}^{n-1}$$
$$A_{j}U_{j+1}^{p} + B_{j}U_{j}^{p} + C_{j}U_{j-1}^{p} = -(S-B).$$

Для того чтобы выполнялось условие «прилипания» на обтекаемых поверхностях независимо от значения dP/dx, нужно, чтобы U_1^0 , U_1^p , U_N^0 и U_N^p были равны нулю. Из приведенных соотношений и условия постоянства расхода в каждом поперечном сечении канала ВЗУ или камеры сгорания вытекает уравнение для определения dP/dx:

$$G_{in} / (S-B) = \int_{0}^{1} \rho U^{0} y^{\nu} d\eta + \frac{dP}{dx} \int_{0}^{1} \rho U^{p} y^{\nu} d\eta.$$

Определение градиента давления осуществляется внутри цикла итераций по нелинейности для уравнений второго порядка.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРЯМОТОЧНЫМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Параметры дозвукового течения на выходе из ВЗУ, в камере сгорания ПВРД и при истечении через выходное сопло определяются формой ВЗУ, формой камеры сгорания, термогазодинамическими процессами, протекающими в ней, и условиями истечения продуктов сгорания через критическое сечение выходного сопла. Поэтому результаты комплексного расчета в строгой постановке можно получить только методом установления по времени, решая полную систему уравнений газовой динамики и химической кинетики [5]. В рамках такого подхода решаются нестационарные двумерные или трехмерные уравнения газовой динамики при соответствующих граничных условиях, которые учитывают форму поверхностей ВЗУ, камеры сгорания и дозвуковой части выходного сопла. Для решения этих уравнений могут быть использованы промышленные программные комплексы (FlowVision, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT,

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

SolidWorks и др.), которые в настоящее время получили широкое распространение в инженерной практике [5]. Однако применение алгоритмов метода установления требует больших затрат машинного времени (от нескольких суток до месяца). Кроме того, в практике проектно-конструкторских работ проектная отработка элементов ПВРД производится отдельно и, как правило, в разных подразделениях, в которые передаются соответствующие исходные данные. В то же время для согласования исходных данных для отдельных элементов ПВРД представляется необходимым иметь алгоритмы и программное обеспечение для комплексного определения проектных и эксплуатационных параметров ЛА с ПВРД в целом. Для этого целесообразно применять методы оперативного расчета, построенные на алгоритмах маршевого решения уравнений газовой динамики вдоль элементов канала ПВРД. Описание этих методов и особенностей их применения для расчета различных течений в струях и каналах приведены в работах [12, 13, 15].

Интеграция элементов ЛА требует исследования течения у наветренной поверхности тела, в тех областях, где происходит формирование потока газа, поступающего в ВЗУ. Поверхность носовой части фюзеляжа должна обеспечивать торможение набегающего потока, и следовательно, его сжатие перед входом в канал ВЗУ. Носовая часть фюзеляжа обычно проектируется так, чтобы обеспечить минимальные потери полного давления набегающего потока при его сжатии в системе скачков уплотнения относительно небольшой интенсивности

Проведение маршевого расчета обтекания нижней поверхности фюзеляжа ЛА с учетом отвода части воздушного потока через канал ВЗУ возможно в случае расчетного режима течения. Часть потока, которая втекает в канал ВЗУ, исключается из расчета обтекания нижней поверхности фюзеляжа ЛА. За входным сечением канала ВЗУ нижняя расчетная область будет заключена между внешней поверхностью обечайки ВЗУ и головным скачком. Расчет сверхзвукового течения в этой области ведется до выходного сечения сопла. За срезом сопла осуществляется переход к совместному расчету струи продуктов сгорания, вытекающей через сопло, и внешнего потока воздуха около нижней поверхности фюзеляжа ЛА.

Следующий комплекс задач связан с решением ряда задач об определении параметров сверхзвукового течения воздуха во входной части канала ВЗУ, дозвукового течения на выходе ВЗУ перед входом в камеру сгорания и термогазодинамических параметров течения топливно-воздушной смеси в камере сгорания. Геометрические параметры ВЗУ подбираются так, чтобы обеспечить заданное проектантами значение коэфициента скорости λ_k воздуха на входе в камеру сгорания. Воспламенение и горение керосина в камере сгорания приводит к повышению температуры и подводу тепла к продуктам сгорания, в результате чего может возникать тепловое запирание потока. Поэтому форма канала камеры сгорания должна подбираться таким образом, чтобы исключалось тепловое запирание потока. Параметры потока, полученные на выходе из камеры сгорания, используются в качестве начальных данных при расчете течения в выходном сопле. По этим параметрам определяется площадь критического сечения сопла и строится его форма.

Таким образом, маршевый комплексный оперативный расчет ЛА с ПВРД сводится к следующему:

 а) расчет обтекания нижней поверхности фюзеляжа ЛА с учетом отвода части воздушного потока через канал ВЗУ;

б) расчет течения в ВЗУ с подбором положения прямого скачка, обеспечивающего заданное значение коэффициента скорости λ_k на выходе из канала ВЗУ, который имеет две составляющие:

– расчет сверхзвукового течения в ВЗУ;

 – расчет дозвукового течения в канале ВЗУ за прямым скачком;

в) расчет дозвукового течения в камере сгорания с учетом подачи керосина и кинетики его горения;

г) расчет течения в сопле, который имеет следующие составляющие:

— определение площади критического сечения сопла на основе параметров, полученных на

выходе из камеры сгорания, для заданного значения коэффициента скорости λ_k на выходе из ВЗУ;

 определение сверхзвуковых параметров в конце области трансзвукового течения в сопле;

– расчет сверхзвукового течения в сопле;

д) комплексный расчет течения в струе продуктов сгорания с учетом их догорания и взаимодействия со сверхзвуковым потоком воздуха, возмущенным обтеканием нижней части ЛА.

Предлагаемая схема комплексного расчета течения около ЛА с ПВРД позволяет проводить расчеты течений как около всего ЛА с ПВРД, так и около отдельных его элементов с приближенной аппроксимацией параметров потоков на выходе из элементов ПВРД, которые могут быть исключены из расчета.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТОВ ОКОЛО ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРЯМОТОЧНЫМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И ОКОЛО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЦЕЛОМ

Особенности расчета течения в канале воздухозаборного устройства с противодавлением. Основное требование при проектировании формы ВЗУ состоит в обеспечении требуемого значения коэффициента скорости λ_k в выходном сечении канала ВЗУ. При этом в зависимости от выбора формы носового обтекателя и формы ВЗУ изменяется коэффициент восстановления полного давления $\sigma < 1.0$ на выходе из ВЗУ.

Обычно при выборе ВЗУ для ПВРД с дозвуковым режимом горения задается значение $\lambda_k < 1$, а форма носового обтекателя и форма ВЗУ подбираются таким образом, чтобы в штатном режиме сверхзвукового полета обеспечивалось максимально возможное значение коэффициента σ . В связи с требованиями, связанными с максимальным торможением сверхзвукового потока и минимальными потерями полного давления, вопрос выбора формы носового обтекателя и формы канала ВЗУ является ключевым при проектировании ПВРД. Выбор формы ВЗУ требует многочисленных расчетов, для проведения которых необходимо иметь методики оперативного расчета, которые позволяют проводить оценочные расчеты, не прибегая к программным комплексам, требующим часы и сутки на проведение расчетов. При разработке алгоритмов были проведены тестовые расчеты течения в плоском канале ВЗУ типичной формы, показанной на рис. 1. Здесь приведено поле изомахов, которое хорошо иллюстрирует картину течения в канале ВЗУ. Четко видно формирование скачков уплотнения при обтекании носового обтекателя (слева от точки *а*) и в сверхзвуковой части ВЗУ. Результаты получены для условий полета на высоте H = 30 км при числе Маха $M_{\infty} = 4.1$.

Координаты опорных точек, которые были использованы для задания формы ВЗУ, представлены в табл. 1.

Для подтверждения возможности предварительного выбора формы на основе результатов расчетов маршевым методом были проведены расчеты обтекания ВЗУ методом установления по времени по схеме Годунова при заданных значениях давлений P_k в выходном сечении канала. При проведении расчетов использовалась двумерная расчетная сетка, содержащая 1530 ячеек в продольном и 100 ячеек в поперечном

Таблица 1. Координаты опорных точек, используемых для задания стенок воздухозаборного устройства плоской формы

Опорная точка	х, см	у, см
0	0	0
a	283	-100
b	567	-95
с	608	-85
d	808	-85
e	592	-74
$\int f$	807	-70

Таблица 2. Средние значения параметров потока в выходном сечении канала воздухозаборном устройстве, полученные с использованием маршевого алгоритма и метода установления

Метод расчета	λ	σ	Р	ρ	М
Маршевый метод	0.500	0.811	5.146	28.87	0.468
Метод установления	0.503	0.790	5.000	28.18	0.469

направлении. Затраты времени на расчет поля течения при заданном давлении на выходе из B3У составляют от четырех до десяти часов для ПЭВМ с тактовой частотой 2.4 ГГц. Время расчета увеличивается при приближении прямого скачка к горлу канала. При использовании маршевого метода в поперечных сечениях была выбрана равномерная расчетная сетка, состоящая из 100 ячеек. В продольном направлении было выполнено около 5 тыс. маршевых шагов с числом Куранта, равным 0.80. Как правило, время расчета одного варианта на такой расчетной сетке не превосходит одной-двух минут.

На рис. 2 приведены распределения давления и скорости вдоль верхней стенки канала ВЗУ, полученные обоими методами для свободного вытекания (линии *1*) и вытекания с формированием прямого скачка в канале (линии *2* и *3*).

В приведенных результатах расчетов координата $x = x_{shock}$ прямого скачка, в котором имеет место переход от сверхзвукового к дозвуковому режиму течения, определялась в результате применения метода установления.

Линии 2 соответствуют результатам расчетов для положения прямого скачка $x_{shock} = 6.14$, а линии $3 - x_{shock} = 7.26$. Сплошными линиями нанесены результаты маршевого расчета, а штрих-пунктирными линиями — метода установления.



Рис. 1. Поле изомахов в ВЗУ (o, a, b, c, d, e, f — опорные точки, координаты которых используются для задания плоской формы ВЗУ)

В проектных расчетах при использовании маршевого метода координата $x = x_{shock}$ задается в горле канала — в поперечном сечении с минимальной площадью. В табл. 2 приведены средние параметры потока в выходном сечении канала ВЗУ при расположении прямого скачка в горле канала, полученные маршевым методом и методом установления.

Результаты расчетов, полученные обоими методами, хорошо согласуются не только в области сверхзвукового течения, но и в дозвуковой области за прямым скачком, хотя в маршевом методе при использовании квазиодномерного алгоритма расчета параметры потока постоянны в поперечном сечении, а в методе установления учитывается изменение параметров по ширине канала ВЗУ. При свободном сверхзвуковом вы-



Рис. 2. Распределения давления (*a*) и скорости (δ) вдоль верхней стенки канала ВЗУ, полученные маршевым методом (сплошные линии) и методом установления (штрих-пунктирные линии): *1* — для свободного вытекания и с формированием прямого скачка, *2* — в сечении $x_{shock} = 6.14$, *3* — в сечении $x_{shock} = 7.26$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

текании маршевый метод обеспечивает лучшее разрешение вдоль оси x по сравнению с методом установления и позволяет получать волновую структуру при отражении скачков от стенок на участке канала за его горлом (сплошные линии 1 на рис. 2). В методе установления такую волновую структуру на участке канала за его горлом получить не удается.

Определение параметров вдоль камеры сгорания. При предварительном проектировании формы камеры сгорания могут быть использованы два подхода. В первом подходе численно рассчитывается торможение сверхзвукового потока до дозвуковой скорости в канале ВЗУ при заданном значении коэффициента скорости λ_{ν} в выходном сечении ВЗУ. Параметры потока, полученные на выходе из ВЗУ, используются в качестве начальных данных для расчета течения в камере сгорания. Во втором подходе расчет течения в ВЗУ не производится, а задаются значения коэффициента скорости λ_ν и коэффициента восстановления полного давления о на выходе из ВЗУ. По заданным значениям λ_k и σ вычисляются параметры потока на входе в камеру сгорания. Применение второго подхода оправдывается тем, что в проектных исследованиях форма ВЗУ часто выбирается так, чтобы на его выходе получались конкретные значения λ_{k} .

Воспламенение и горение керосина в камере сгорания приводит к повышению температуры и подводу тепла к продуктам сгорания, в результате чего может возникать тепловое запирание потока. Поэтому форма камеры сгорания должна подбираться таким образом, чтобы исключалось тепловое запирание потока. Для предотвращения теплового запирания потока достаточно увеличивать площадь поперечного сечения канала вдоль камеры сгорания, что приводит к торможению дозвукового потока.

Для определения параметров дозвукового течения в камере сгорания с учетом процессов воспламенения и горения керосина можно использовать приближение «узкого канала». Типичные результаты, полученные для камеры сгорания в этом приближении, приведены в работе [17].

При проведении оценочных расчетов для определения параметров в камере сгорания и вы-

яснения основных особенностей воспламенения и горения керосина, в частности оценки длины зоны выгорания керосина, влияния горения на изменение параметров течения в камере сгорания и др., можно использовать приближение квазиодномерного течения [12]. В рамках этого приближения используются соотношения сохранения массы, энтальпии и продольного импульса

$$\rho UF = \rho_1 U_1 F_1 = A_1, \quad i + \frac{U^2}{2} = H_0, \quad (9)$$

$$(P + \rho U^2)F = (P_1 + \rho_1 U_1^2)F_1 + \int_1 P \frac{dF}{dx} dx = A_2, \quad (10)$$

где нижний индекс 1 соответствует значениям параметров потока на входе в камеру сгорания.

Эти соотношения дополняются уравнениями химической кинетики (7) для каждого компонента. Для определения зависимости энтальпии от температуры и концентраций компонентов продуктов сгорания использовались данные [18].

Алгоритм решения. Определяются концентрации компонентов и координата (n + 1)-го расчетного сечения

$$X_k^{n+1} = X_k^n + W_k d\tau ,$$
$$x^{n+1} = x^n + U \cdot d\tau .$$

Задается начальное значение температуры T в (n+1)-м сечении.

Из решения уравнений (9) и (10), дополненных уравнением состояния для смеси продуктов сгорания (6), определяются параметры

$$U = \frac{1}{2} \frac{A_2}{A_1} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 4\frac{R_0}{m}T}$$
$$P = \frac{A_2 - A_1U}{F}, \quad \rho = \frac{P \cdot m}{R_0 T},$$
$$h = H_0 - \frac{1}{2}(U^2 + V^2).$$

Проверяется условие $|h-h_C| \le \varepsilon h$, где $h_C = \sum X_k h_k(T)$, ε — малая величина. Если это условие не выполняется, то следующее приближение по температуре определяется методом хорд или методом деления промежутка пополам — методом сканирования.



Рис. 3. Изменения скорости U/V_{∞} , числа Маха M = u/a, давления $P/(\rho_{\infty} \times V_{\infty}^2)$ и температуры *T*, К вдоль средней линии камеры сгорания



Рис. 4. Изменение концентраций компонентов газовой смеси вдоль камеры сгорания

Типичный характер изменения параметров потока вдоль камеры сгорания показан на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены изменения скорости, числа Маха, давления, температуры вдоль средней линии камеры сгорания. Изменения концентраций кислорода, паров керосина и продуктов сгорания CO₂, H₂O показаны на рис. 4, *а*. Промежуточные компоненты CO, H₂ и другие, которые имеются в окрестности области воспла-

менения, составляют не более одного процента (рис. 4, δ).

Воспламенение керосина приводит к подводу тепла к дозвуковому потоку, вследствие чего возрастают число Маха, скорость и температура, а давление уменьшается. В областях до интенсивного воспламенения и после полного сгорания керосина расширение камеры сгорания приводит уменьшению скорости и числа Маха. Сте-



Рис. 5. Поле изолиний температуры при взаимодействии выхлопной струи продуктов сгорания с возмущенным набегающим потоком около корпуса ЛА

пень расширения камеры сгорания определяется тангенсом угла наклона ее верхней стенки dS/dx. В расчетах принято значение dS/dx == 0.0225. При меньших значениях расширения подвод тепла вследствие горения приводит к звуковому «запиранию» течения в камере сгорания.

Определение параметров сверхзвукового потока за выходным сечением сопла. Параметры потока, полученные на выходе из камеры сгорания, используются в качестве начальных данных при расчете течения в сопле. Сначала по этим параметрам и площади выходного сечения камеры сгорания, являющегося в то же время и входным сечением сопла, определяется площадь критического сечения сопла, обеспечивающая полученный в камере сгорания расход продуктов сгорания. По форме канала в начальном сечении сопла и полученной площади критического сечения сопла строится форма сопла Лаваля.

Важно отметить, что при маршевом решении задачи площадь критического сечения сопла всегда должна быть согласована с параметрами потока в камере сгорания, так как такое несогласование приводит к перестройке течения как в камере сгорания, так и в ВЗУ. В этом случае для получения результата необходимо применять методы установления, что приводит к большим затратам машинного времени и к практической невозможности оперативного комплексного определения параметров.

При определении параметров сверхзвукового потока за выходным сечением сопла следует разделять нижнюю и верхнюю части струи продуктов сгорания. В верхней части потока реализуется обтекание поверхности тела. Если до выходного среза сопла это была поверхность верхней стенки сопла, то за выходным сечением — это нижняя поверхность хвостовой части фюзеляжа. За выходным сечением сопла имеем три области течения, расположенные сверху вниз по вертикали: поток в струе продуктов сгорания, набегающий на нижнюю поверхность хвостовой части фюзеляжа и ограниченный границей струи продуктов сгорания (контактным разрывом); воздушный поток между «границей» струи и косым скачком, сформировавшимся перед струей; возмущенный воздушный поток между косым скачком и головной ударной волной от носовой части ЛА. Алгоритм расчета с использованием трех областей является достаточно сложным, так как необходимо учитывать изменение давления на границе струи при продвижении вдоль тела.

Более простым является алгоритм решения с одной расчетной областью, заключенной между головной ударной волной и нижней поверхностью хвостовой части фюзеляжа. В этом алгоритме нижняя граница струи (контактный разрыв) и косой скачок не выделяются, а рассчитываются «насквозь». На нижней границе задаются условия Рэнкина — Гюгонио, а на верхней — условия обтекания поверхности фюзеляжа. Начальное поле потока в выходном сечении сопла формируется из двух частей: нижней — возмущенного воздушного потока между нижней кромкой сопла и головной ударной волной; верхней — потока продуктов сгорания в выходном сечении сопла. В рассматриваемом подходе возникает необходимость формирования возмущенного поля воздушного потока около нижней поверхности ЛА до сечения среза сопла.

Типичная картина течения за ударной волной, сформированной при взаимодействии струи с возмущенным полем набегающего потока около корпуса ЛА, и в выхлопной струе продуктов сгорания представлена на рис. 5 для поля изолиний температуры.



Рис. 6. Поля изолиний температуры, числа Маха и давления, полученные в результате комплексного расчета течения в канале ПВРД

Общие особенности полей параметров в гиперзвуковом летательном аппарате с прямоточным воздушно-реактивным двигателем. Были проведены расчеты течения в ПВРД с воздухозаборным устройством, форма которого приведена на рис. 1, для числа Маха набегающего потока $M_{\infty} = 4.1$. Общая картина обтекания рассматриваемой модели ПВРД представлена на рис. 6 в виде полей изолиний температуры, числа Маха и давления, полученных в результате комплексного расчета.

На рис. 7 приведена более детальная информация в виде распределения давления (*a*), плотности (δ), коэффициента скорости λ (*в*) и температуры (*г*) вдоль ПВРД. Набегающий поток сжимается в ВЗУ и тормозится до дозвуковой скорости в выходном сечении ВЗУ, совпадающем с входным сечением камеры сгорания. В камере сгорания в дозвуковой поток подается керосин, который воспламеняется и начинает гореть в кислороде воздуха, в результате чего происходит резкое повышение температуры (рис. 7, ϵ), которое сопровождается ускорением потока и понижением давления (рис. 7, ϵ и a). Изменение параметров потока в камере сгорания обусловлено влиянием двух факторов — подводом тепла и изменением площади поперечного сечения канала.

До полного сгорания керосина превалирует первый фактор, обусловленный повышением



Рис. 7. Распределения давления $P/(\rho_{\infty} \times V_{\infty}^2)$ (*a*), плотности $\rho = \rho/\rho_{\infty}$ (*б*), коэффициента скорости λ (*s*) и температуры (*г*) вдоль ПВРД

температуры за счет интенсивного сгорания керосина, что приводит к увеличению скорости потока и уменьшению давления.

При интенсивном подводе тепла, вызванным горением керосина, возможно «тепловое запирание» [4, 17] потока в канале камеры сгорания. Для предотвращения возникновения этого эффекта должно быть обеспечено такое увеличение площади поперечного сечения канала камеры сгорания, при котором коэффициент скорости продуктов сгорания остается меньшим единицы.

После полного сгорания керосина основное влияние на поток оказывает второй фактор, связанный с увеличением площади поперечного сечения канала камеры сгорания, что приводит к торможению горячего дозвукового потока и росту давления.

Затем горячий дозвуковой поток расширяется в сопле до сверхзвуковой скорости, при этом происходит его охлаждение. Давление резко падает при переходе от дозвукового к сверхзвуковому течению, которое происходит за критическим сечением сопла. В конце сопла сверхзвуковой поток струи продуктов сгорания начинает взаимодействовать с набегающим потоком воздуха, в результате чего формируется скачок и поверхность контактного разрыва, разделяющая продукты сгорания и воздушный поток.

В сверхзвуковой струе, ограниченной снизу скачком, а сверху нижней поверхностью корпуса ПВРД, происходит догорание продуктов сгора-



Рис. 8. Изменение безразмерных продольной F_x и поперечной F_y сил вдоль канала для трех значений расширения камеры сгорания ПВРД. Кривые 1-3 - dS/dx = 0.085, 0.105, 0.125 соответственно

Таблица З. Вклад элементов ПВРД в продольную силу в зависимости
от тангенса угла наклона верхней стенки камеры сгорания

dS/da					
us/ux	ВЗУ камера сгорания сопло хвостовая часть ЛА		суммарно		
0.085 0.100 0.120	0.0044	-0.864 -1.099 -1.315	-0.688 -0.724 -0.773	-0.087 -0.101 -0.116	-1.635 -1.920 -2.200

ния в кислороде дополнительно поступающего воздуха.

Формирование силового воздействия на элементы летательного аппарата. При протекании воздуха через ВЗУ и продуктов сгорания в канале камеры сгорания и через сопло поток оказывает силовое воздействие на стенки канала ПВРД. Для получения силового воздействия потока \mathbf{F}_{sum} на стенки канала необходимо проинтегрировать распределение давления вдоль нижней и верхней стенок канала единичной ширины, а затем сложить их.

На рис. 8 показано изменение безразмерной продольной (F_x) и поперечной (F_y) сил вдоль канала при различных расширениях камеры сгорания ПВРД, задаваемых тангенсом угла наклона верхней стенки камеры сгорания. Отрицательная продольная сила F_x , направленная вдоль тела в сторону носка ЛА, создает тягу.

В табл. 3 показан вклад элементов ПВРД в продольную силу при различных углах наклона верхней стенки камеры сгорания. Видно, что ВЗУ создает силу сопротивления движению ЛА. Вклад в тягу двигателя как камеры сгорания, так и сопла растет с увеличением угла наклона верхней стенки камеры сгорания.

Нормальная сила, действующая на канал ПВРД, складывается из разнонаправленных сил, воздействующих на нижнюю и верхнюю стенку канала. Внутри канала ПВРД эта сила колеблется около нулевого значения и начинает расти за срезом сопла.

Из рис. 8, б видно, что использование выхлопной струи продуктов сгорания для омывания нижней вогнутой поверхности хвостовой части фюзеляжа ЛА позволяет увеличить продольную и нормальную силы, действующие на ЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено расчетно-методическое обеспечение для оперативных комплексных расчетов термогазодинамических процессов в элементах ПВРД, интегрированного с корпусом ЛА. Численное моделирование течения около корпуса ЛА и в элементах ПВРД основано на уравнениях Эйлера и приближенных моделях уравнений Навье — Стокса — «вязкого слоя» и «узкого канала», для решения которых используются маршевые алгоритмы расчета, которые позволяют сократить затраты времени на получение результатов на несколько порядков. По результатам расчетов в двумерном приближении описаны основные особенности термогадинамических процессов в отдельных элементах ЛА стилизованной формы. В процессе маршевого расчета для заданных значений параметров формы элементов ПВРД можно быстро оценить возможность возникновения звукового «запирания» течения в камере сгорания, обусловленного горением керосина, и подобрать площадь околокритической части выходного сопла. Предложенное расчетно-методическое обеспечение может быть рекомендовано к использованию на предварительном этапе выбора формы элементов ПВРД.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Артемов О. А. *Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (расчет характеристик)*: Монография. Москва: Компания Спутник+, 2006. 374 с.
- 2. Борисов А. Д., Васютичев А. С., Лаптев И. В. К выбору параметров прямоточного воздушно-реактивного двигателя, обеспечивающих заданный режим маршевого полёта летательного аппарата. *Тр. МАИ*. 2018. № 100. URL: http://trudymai.ru/published.php? (дата звернення 09.07.2019).
- 3. Гунько Ю. П., Мажуль И. И. Интегральная аэрогазодинамика гиперзвуковых летательных аппаратов с прямоточными воздушно-реактивными двигателями со сверхзвуковым горением. *Теплофизика и аэромеханика*. 1995. **3**, № 4. С. 309—321.
- 4. Гутов Б. И., Звегинцев В. И., Мельников А. Ю. Влияние теплоподвода в камере сгорания на течение в диффузоре сверхзвукового воздухозаборника. Вестник Пермского нац. исслед. политех. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2017. № 50. С. 15—25.
- 5. Жуков В. Т., Мануковский К. В., Новикова Н. Д., Рыков Ю. Г., Федоритова О. Б. Исследование картины течения в модельном тракте двигателя высокоскоростного летательного аппарата. *Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2015. № 5. 23 с.
- 6. *Карасев В. Н., Левин В. М.* Моделирование тяговых характеристик прямоточного воздушно-реактивного двигателя для больших сверхзвуковых скоростей полета. *Тр. МАИ*. 2013. № 64. URL www.mai.ru/science/trudy (дата звернення 09.07.2019).
- 7. Ковеня В. М., Тарнавский Г. А., Черный С. Г. *Применение метода расщепления в задачах газовой динамики*. Москва: Наука, 1981. 304 с.
- 8. Копченов В. И., Гуськов О. В. О формировании режима горения и газодинамической структуры потока в канале при сверхзвуковых условиях на входе. Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4(5). С. 2260—2262.
- 9. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. Москва: Наука, 1989. 368 с.
- 10. Левин В. М. Проблемы организации рабочего процесса в ПВРД. Физика горения и взрыва. 2010. 46, № 4. С. 45-55.
- 11. Рогов Б.В., Соколова И. А. Обзор моделей вязких внутренних течений. *Математическое моделирование*. 2002. 14, № 1. С. 87—96.
- 12. Тимошенко В. И. Теоретические основы технической газовой динамики. Киев: Наукова думка, 2013. 426 с.
- 13. Тимошенко В. И. Однородный алгоритм расчета истечения вязкой сверхзвуковой струи в затопленное пространство. *Техническая механика*. 2019. № 1. С. 16—24.
- 14. Тимошенко В. И., Белоцерковец И. С., Галинский В. П. Концептуальные вопросы математического моделирования процессов аэрогазотермодинамики гиперзвукового летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем. Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы: сб. науч. тр. 2006. Вып. 2. С. 161—181.
- 15. Тимошенко В. И., Галинский В. П. Особенности алгоритмов расчета течения в канале воздухозаборного устройства с противодавлением. *Техническая механика*. 2017. № 3. С. 16—22.
- 16. Тимошенко В. И., Гусынин В. П. Использование гиперзвуковых технологий при создании перспективных транспортных космических систем. Космическая наука и технология. 1999. **5**, № 1. С. 87—107.

- 17. Тимошенко В. И., Дешко А. Е. К вопросу о рациональной организации процессов смешения и горения в камере сгорания ПВРД. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 8 (125). С. 75—81.
- Choi J. Y. A Quasi Global Mechanism of Kerosene Combustion for Propulsion. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (31 July – 03 August 2011). San Diego, California, 2011. AIAA-2011-5853.pdf.
- 19. Gear C. W. Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1971. 220 p.

Стаття надійшла до редакції 09.07.2019

REFERENCES

- 1. Artemov O. A. (2006). Ramjet engines (calculation of characteristics). M.: Kompanija Sputnik+ [in Russian].
- Borisov A. D., Vasjutichev A. S., Laptev I. V. (2018). To the choice of parameters of a ramjet engine, providing a given mode of the main flight of the aircraft. *Trudy MAI*, No. 100. URL: http://trudymai.ru/published.php? (Last accessed: 09.07.2019) [in Russian].
- 3. Gun'ko Ju. P., Mazhul' I. I. (1995). Integrated aero-gas dynamics of hypersonic aircraft with ramjet engines with supersonic combustion. *Teplofizika i ajeromehanika*, **3**, No. 4, 309–321 [in Russian].
- Gutov B. I., Zvegincev V. I., Mel'nikov A. Ju. (2017). The effect of heat supply in the combustion chamber on the flow in the diffuser of a supersonic air intake. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Aje*rokosmicheskaja tehnika, No. 50, 15–25 [in Russian].
- 5. Zhukov V. T., Manukovskij K. V., Novikova N. D., Rykov Ju. G., Fedoritova O. B. (2015). Study of the current pattern in the model tract of a high-speed aircraft engine. *Preprint IPM im. M. V. Keldysha*, No. 5, 23 p. [in Russian].
- Karasev V. N., Levin V. M. (2013). Simulation of ramjet propulsion characteristics for high supersonic flight speeds. *Trudy MAI*, No. 64. URL: http://trudymai.ru/published.php? (Last accessed: 09.07.2019) [in Russian].
- 7. Kovenja V. M., Tarnavskij G. A., Chernyj S. G. (1981). *Application of the splitting method in problems of gas dynamics*. M.: Nauka [in Russian].
- Kopchenov V. I., Gus'kov O. V. (2011). On the formation of the combustion regime and gas-dynamic structure of the flow in the channel for supersonic conditions at the inlet. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*, No. 4(5), 2260–2262 [in Russian].
- 9. Lapin Ju. V., Strelec M. H. (1989). Internal flow of gas mixtures. M.: Nauka [in Russian].
- 10. Levin V. M. (2010). Problems of workflow organization in the ramjet. Fizika gorenija i vzryva, 46, No. 4, 45–55 [in Russian].
- 11. Rogov B. V., Sokolova I. A. (2002). Overview of viscous internal flow patterns. *Matematicheskoe modelirovanie*. **14**, No. 1, 87–96 [in Russian].
- 12. Timoshenko V. I. (2013). Theoretical foundations of technical gas dynamics. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
- 13. Timoshenko V. I. (2019). Homogeneous algorithm for calculating the flow of a viscous supersonic jet into a submerged space. *Tehnicheskaja mehanika*, No. 1, 16–24 [in Russian].
- 14. Timoshenko V. I., Belocerkovec I. S., Galinskij V. P. (2006). Conceptual issues of mathematical modeling of processes of aerogasothermodynamics of a hypersonic aircraft with a ramjet engine. *Ajerogidrodinamika: problemy i perspektivy: sb. nauch. trudov*, No. 2, 161–181 [in Russian].
- 15. Timoshenko V. I., Galinskij V. P. (2017). Features of the algorithms for calculating the flow in the air intake channel with backpressure. *Tehnicheskaja mehanika*, No. 3, 16–22 [in Russian].
- Timoshenko V. I., Gusynin V. P. (1999). The use of hypersonic technology in the creation of advanced transport space systems. *Kosmicheskaja nauka i tehnologii*, 5, No. 1, 87–107 [in Russian].
- 17. Timoshenko V. I., Deshko A. E. (2015). To the question of the rational organization of the processes of mixing and burning in the combustion chamber of a ramjet. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, No. 8 (125), 75–81 [in Russian].
- Choi J. Y. (2011). A Quasi Global Mechanism of Kerosene Combustion for Propulsion. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (31 July – 03 August 2011). San Diego, California, 2011. AIAA-5853.pdf.
- 19. Gear C. W. (1971). Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. 220 p.

Received 09.07.2019

В. І. Тимошенко зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук, проф. В. П. Галінський старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб. Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

E-mail: itm12@ukr.net

E-mail: office.itm@nas.gov.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АЕРОГАЗОТЕРМОДИНАМІКИ НАДЗВУКОВОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА З ПРЯМОТОЧНИМ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИМ ДВИГУНОМ

Обговорюються основні питання розробки розрахунково-методичного забезпечення для проведення оперативних комплексних розрахунків термогазодинамічних процесів у елементах прямоточного повітряно-реактивного двигуна (ППРД), інтегрованого з корпусом літального апарата (ЛА), маршовими методами. Чисельне моделювання течії у ППРД розбивається на три складові — обтікання корпусу ЛА, течія у повітрозабірному пристрої (ПЗП), камері згоряння і соплі з вихлопним струменем. Розрахунок надзвукової течії біля корпуса апарата, у вхідній частині ПЗП і у вихлопному струмені здійснюється в нев'язкому наближенні з використанням схеми Годунова або з урахуванням в'язкості з використанням моделі «в'язкого шару». В області дозвукової течії у вихідній частині ПЗП і дозвукової нерівноважної течії в камері згоряння течія розраховується з використанням моделі «вузького каналу» або у квазіодновимірному наближенні. Обговорюються питання підбору геометричних параметрів камери згоряння і біля критичної частини вихідного сопла у випадку завдання параметрів потоку на виході з ПЗП. Проведено аналіз різних моделей запалення і горіння гасу в камері згоряння. Розрахунок течії у вихлопному струмені здійснюється з урахуванням обтікання нижньої хвостової частини поверхні ЛА і взаємодії струменя зі збуреним потоком повітря, що набігає. Приводяться результати оціночних розрахунків окремих елементів і повного компонування літального апарата стилізованої форми у двовимірному наближенні.

Ключові слова: оперативний чисельний розрахунок, термогазодинамічні процеси, прямоточний повітряно-реактивний двигун, літальний апарат, повітрозабірний пристрій, камера згоряння, сопло, вихлопний струмінь, горіння гасу, маршові методи розрахунку.

Timoshenko V. I. head of department, PhD (Phys.-Math), Professor *Galinskiy V. P.* Senior Researcher, PhD (Phys.-Math) Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine 15 Leshko-Popelya St., Dnipro, 49005 Ukraine E-mail: itm12@ukr.net E-mail: office.itm@nas.gov.ua

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF AIR GAS THERMODYNAMICS OF THE SUPERSONIC AIRCRAFT WITH A RAMJET

The main issues of the development of design and methodological support for carrying out operational integrated calculations of thermogasdynamic processes in the components of a ramjet engine, integrated with the body of the aircraft, are discussed. The numerical simulation of the flow in a ramjet engine is divided into three components - flow past the aircraft body, flow in the air intake device (AID), the combustion chamber and the nozzle with the exhaust stream. The calculation of supersonic flow near the body of the aircraft, in the entrance part of the AID and in the exhaust jet is carried out in the non-viscous approximation using the Godunov scheme or taking into account the viscosity using the "viscous layer" model. In the region of subsonic flow in the output part of the AID and subsonic nonequilibrium flow in the combustion chamber is calculated using the "narrow channel" model or in the quasi-one-dimensional approximation. The issues of selecting the geometric parameters of the AID are discussed. The analysis of various models of ignition and combustion of kerosene in the combustion chamber is accomplished. The flow in the exhaust jet is calculated taking into account the flow past the lower tail portion of the surface of aircraft and the interaction of the jet with a disturbed incoming flow of air. Presents the results of the estimated two dimension calculations of individual elements and the complete layout of the stylized aircraft.

Keywords: operational numerical calculation, thermogasdynamic processes, ramjet, aircraft, air intake device, combustion chamber, nozzle, exhaust jet, kerosene combustion, marching calculation methods.

Космічна й атмосферна фізика

Space and Atmospheric Physics

https://doi.org/10.15407/knit2020.02.019 УДК 550.388.2+550.34

В. В. КОШОВИЙ¹, пров. наук. співроб., канд. техн. наук, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. Шацької міжвідомчої науково-дослідної екологічної лаб. E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovyy@gmail.com О. Л. IBAHTИШИН¹, зав. лаб., канд. техн. наук Р. Т. НОГАЧ², наук. співроб. Л. Ф. ЧОРНОГОР³, д-р фіз.-мат. наук, проф., Лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, двічі Лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, Лауреат Премії МВССО СРСР, Заслужений діяч науки і техніки України **3. Т. НАЗАРЧУК¹**, директор ін-ту, акад. НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. М. О. МЕЛЬНИК², зав. відділу, канд. техн. наук Б. І. КАЛІТА², заст. зав. відділу **Б. С. ХАРЧЕНКО¹**, зав. сектору I. М. РОМАНИШИН¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук А. Б. ЛОЗИНСЬКИЙ¹, мол. наук. співроб. Б. П. РУСИН¹, зав. відділу, д-р техн. наук, проф. Л. М. КАРАТАЄВА², мол. наук. співроб. **3. І. ЛЮБІНЕЦЬКИЙ²**, заст. зав. лаб. Л. В. АЛЬОХІНА², зав. лаб. В. К. ЛІПСЬКИЙ², зав. сектору ¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України вул. Наукова 5. Львів. Україна. 79053 ²Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України вул. Наукова 5А, Львів, Україна, 79060

³ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ШТУЧНА АКУСТИЧНА МОДИФІКАЦІЯ НАВКОЛОЗЕМНОГО СЕРЕДОВИЩА

Досліджуються деякі можливості реалізації штучної акустичної модифікації навколоземного середовища від поверхні Землі до іоносферних висот при використанні наземного керованого акустичного випромінювача інфразвукового діапазону. Проаналізовано результати попередніх досліджень, а також розглянуто характерні параметри інфразвуку, генерованого природними явищами і рукотворними процесами та особливості його впливу на стан навколоземного середовища. Обґрунтовано основні умови реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери. Наведено і обговорено результати першого етапу верифікації запропонованої методології. Для її верифікації використано: радіоастрономічний метод дистанційного зондування іоносфери, радіовипромінювання космічних радіоджерел як зондувальне, наземний комплекс акустико-електромагнітного зондування іоносфери у складі радіотелескопа УРАН-3 і наземного керованого акустичного випромінювача параметричного типу. Перший етап верифікації здійснювався на частотах, близьких до верхньої межсі інфразвукового діапазону (~30 Гц). Попередній аналіз отриманих результатів підтвердив, що вже у випадку наземної генерації інфразвуку з частотою f ≈ 30 Гц у навколоземному просторі можуть скластися умови, що дозволяють реалізувати керовану акустичну модифікацію іоносфери і виявляти слабкі акустико-іоносферні збурення. Останні можуть формуватися в іоносфері при

Цитування: Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Ногач Р. Т., Чорногор Л. Ф., Назарчук З. Т., Мельник М. О., Каліта Б. І., Харченко Б. С., Романишин І. М., Лозинський А. Б., Русин Б. П., Каратаєва Л. М., Любінецький З. І., Альохіна Л. В., Ліпський В. К. Штучна акустична модифікація навколоземного середовища. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2 (183). С. 19—58. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.019

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

певних станах плазми, а також при станах середовища приземної і верхньої атмосфери, які, в свою чергу, визначають погодні умови у приземному шарі і впливають на параметри генерації і поширення атмосферних акустичних хвиль. Наступний етап роботи передбачає дослідження можливостей реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери з використанням наземного керованого акустичного випромінювача в частотному діапазоні 2...10 Гц.

Ключові слова: навколоземний простір, штучна акустична модифікація іоносфери, наземний керований акустичний випромінювач, радіотелескоп УРАН-3, акустико-іоносферні збурення, радіоастрономічний метод, трансмісійний радіосигнал, розширений спектральний аналіз.

вступ

Неоднорідне навколоземне середовище досить чутливе до енергетики космічного та наземного походження. Серед компонентів системи «Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера» найбільш чутливою до такого впливу є іоносфера. Вивчаючи динаміку її стану, можна виявляти збурення, визначати локалізацію та походження їхніх джерел, прогнозувати виникнення небезпечних явищ на поверхні Землі (землетруси, вулкани, потужні атмосферні процеси тощо). Значні (>50 км) відстані іоносфери від поверхні Землі вимагають спеціальних методів дистанційного зондування її стану.

Більшість потужних збурень літосферного та приземного походження супроводжуються генерацією атмосферних акустичних хвиль (AAX), які поширюються в атмосфері, переносячи основну частину енергії у звуковому чи інфразвуковому діапазонах до іоносферних висот, модифікують стратифіковане з висотою її середовище [22, 23, 31, 33, 35, 36, 45, 70—72, 74], формуючи при цьому в ньому різні типи акустично стимульованих збурень. Параметри цього типу ААХ характеризуються, внаслідок впливу стратифікації середовища поширення, значною дисперсією.

Вищеозначене свідчить про актуальність досліджень наукових проблем, пов'язаних з акустичною модифікацією іоносфери, зокрема процесів поширення ААХ до іоносферних висот, їхньої взаємодії з іоносферною плазмою, виникнення й еволюції акустико-іоносферних збурень (AIЗ), генерованих у нижніх шарах навколоземного середовища, технологій виявлення AIЗ та технологій їхнього діагностування. Всі ці питання об'єднують в єдину науково-практичну проблему акустичної модифікації іоносфери (AMI).

У прикладному плані ця проблема трансформується у проблему короткострокового прогнозування землетрусів, вивержень вулканів тощо. Один із варіантів її розв'язання використовує гіпотезу про генерацію інфразвуку у процесі поширення літосферних газів вздовж тріщин за 1-2 доби до активної фази землетрусу [22, 23, 31, 33, 35, 36, 49, 69] та припущення щодо впливу сейсмічності Землі через акустичні хвилі на іоносферу [2]. Відтак запропоновано застосовувати метод акустико-електромагнітного зондування іоносфери [18], який дозволяє отримати експериментальну інформацію про АІЗ. Процеси формування AI3 природного та рукотворного походження, їхнє трансформування у плазмові хвилі різних типів і поширення на значні відстані, а також питання акустичної стимуляції виникнення різних побічних ефектів широко вивчалися багатьма дослідниками (М. Б. Гохберг, М. Гаякава, М. Парро, Н. Блаунштейн, Е. Бланк, а в Україні — Л. Ф. Чорногор, С. О. Сорока, О. К. Черемних, Ю. Г. Рапопорт, Ю. О. Селіванов та ін.).

Для виявлення й ідентифікації АІЗ та для локалізації джерел інфразвуку необхідно знати закономірності впливу різних чинників, зокрема наземних акустичних збурень, на неоднорідне шарувате навколоземне середовище. Ця частина проблеми досліджена недостатньо, що обмежує на даний час практичну реалізацію методів прогнозування землетрусів на основі акустичних провісників. Лише за останні три-чотири десятиріччя більш інтенсивно почали вивчати генерацію інфразвуку високоенергетичними природними явищами та рукотворними процесами, досліджувати наслідки модифікації різних шарів атмосфери при висотному поширенні ААХ, розробляти моделі та розвивати інформаційні технології опрацювання даних акустико-іоносферної взаємодії.

Наприклад, в роботах [17, 20, 23, 31, 68] допускалась можливість дії декількох фізичних

механізмів літосферно-іоносферних зв'язків і розглядались деякі їхні важливі моделі в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера». В одних із них передбачається, що атмосферні акустичні та акустогравітаційні хвилі (АГХ), генеровані у приземній атмосфері над регіоном підготовки землетрусів, поширюються через атмосферу, досягають іоносферних висот і призводять до збурень електричного поля та модуляції концентрації заряджених частинок. В Україні ці дослідження зосереджені головно у таких наукових установах, як Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (ХНУ), Інститут космічних досліджень НАН та ДКА України (ІКД, Київ), Інститут іоносфери НАН та МОН України (Харків), Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України (ЛЦ ІКД), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ, Львів).

Основними чинниками, що ускладнюють дослідження акустичного каналу літосферно-іоносферної взаємодії, є: відсутність ефективних засобів керованої генерації ААХ високої інтенсивності, здатних досягати іоносферних висот; неоднорідність властивостей іоносфери; нестаціонарність іоносферних процесів, зумовлених випадковим впливом різних природно-техногенних чинників; слабкий відгук іоносфери на акустичний вплив; низька ефективність отримання стійкого та статистично вагомого відгуку іоносфери на приземні акустичні збурення; велика зашумленість сигналів АІЗ та ін.

Згадані особливості необхідно враховувати при дослідженні різних аспектів проблеми АМІ, зокрема в рамках її окремого розділу — штучної (програмованої, за термінологією роботи [19]) акустичної модифікації іоносфери. У цій же праці [19] підкреслено фундаментальність таких досліджень і сформульовано задачу визначення характеристик наземного акустичного збудження, зокрема його мінімальної інтенсивності, при якій формується відгук іоносфери, придатний для його достовірного виявлення та реєстрації наземними або космічними засобами. Фактично йдеться про визначення ефективності впливу наземних акустичного каналу літосферно-іоносферної взаємодії трансформується в задачу оцінювання ефективності акустико-іоносферного впливу техногенних акустичних джерел.

Дана робота враховує наведені вище міркування. Її метою є обґрунтування методології досліджень, проведення яких дозволить оцінити ефективність акустико-іоносферного впливу наземного керованого акустичного випромінювача (НКАВ), розробленого ЛЦ ІКД для дослідження процесів штучної АМІ й інших структурних елементів навколоземного середовища. Для цього в роботі будуть розглядатися такі задачі:

• обгрунтування вибору основних параметрів НКАВ на основі аналізу характерних параметрів інфразвукових хвиль, генерованих різними природними та рукотворними джерелами;

• формулювання методології досліджень штучної акустичної модифікації іоносфери;

• розвиток ідеї дистанційного зондування іоносфери на основі методу і системи акустикоелектромагнітного зондування;

• отримання результатів експериментальної верифікації комплексу, який включає НКАВ, декаметровий радіотелескоп УРАН-3 та прогресивні інформаційні технології обробки даних.

ІНФРАЗВУК, ГЕНЕРОВАНИЙ ПРИРОДНИМИ ТА ТЕХНОГЕННИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Джерела інфразвуку в атмосфері. Акустичні провісники сейсмічної активності найбільш інформативні в інфразвуковому діапазоні [2, 7, 20, 23, 31, 67]. Як відомо, інфразвук — це пружні коливання повітря, частота яких є меншою за 20 Гц і доходить впритул до власної частоти коливань атмосфери (частота Брента — Вяйсяля ~ 0.003 Гц для нижньої атмосфери). Джерелами інфразвуку можуть виступати як природні, так і рукотворні чинники [3, 20—31, 77, 84].

До природних джерел інфразвуку належать різні метеорологічні та сейсмологічні явища, зокрема: потужні урагани, що досягають кількох сотень кілометрів у діаметрі [28]; потужні атмосферні вихори та полярні сяйва протяжністю кілька сотень кілометрів; грозова активність та атмосферні фронти [28, 45, 85]; рух морської поверхні [77]; сходження снігових лавин, падіння метеороїдів та космічного сміття на поверхню



Рис. 1. Деякі з поширених природних та штучних джерел інфразвуку (за даними роботи [80])

Землі, варіації космічної погоди тощо [44, 45, 48, 50, 51, 54, 55, 57, 62—64, 67, 77, 91—93]; виверження вулканів і землетруси, що можуть коливати значні площі земної поверхні [57, 58, 60, 61, 75, 88, 95], тощо.

До рукотворних (техногенних) джерел інфразвуку належать: хімічні й ядерні вибухи [51]; старти та польоти потужних ракет і літаків, що долають великі відстані з надзвуковою швидкістю [46, 47, 59, 61, 76, 79, 81, 83]; вибухи в кар'єрах, виробничу діяльність людини з використанням високоенергетичних технологічних процесів, військові дії [24, 31], аварії на військових арсеналах [24—27, 29—32, 77] тощо. Природні джерела інфразвуку мають в основному випадковий характер, а рукотворні генерують акустичні збурення цілеспрямовано з певними обмежено керованими параметрами, зокрема для дослідження процесів штучної АМІ.

При розробленні адекватної фізико-математичної моделі поширення інфразвукових хвиль необхідно враховувати фактори, що зумовлюють особливості їхнього поширення в атмосфері [3, 77, 84]:

1) велика довжина хвилі λ_s (для ААХ з періодом $T_s = 30$ значення $\lambda_s = 10$ км);

2) хвильові системи охоплюють протяжні відстані в атмосфері;

3) значні просторові розміри джерел інфразвуку, що визначається умовами його генерації в атмосфері, але обмежує можливу кількість джерел (рис. 1) [80]; 4) характерні властивості хвиль скінченної амплітуди, що поширюються до іоносфери зі швидкістю коливань звукового діапазону $v_s \approx 280...$ 340 м/с (на рівні моря при температурі повітря $t_{\text{пов}} = 20$ °C вона дорівнює 343 м/с), яка залежить від $t_{\text{пов}}$ та напрямку і швидкості вітру;

5) малий коефіцієнт молекулярного поглинання, зумовлений малою кінематичною в'язкістю; це відрізняє такі хвилі від «лабораторного звуку»;

6) збільшення тиску та швидкості інфразвукової хвилі зі зменшенням щільності приземної атмосфери з висотою ($z \propto \exp(z/(2H_a))$, де H_a масштаб висоти) і багатократне (в сотні разів) збільшення числа Маха порівняно з його значенням на поверхні Землі;

7) вплив нестабільних і непередбачуваних факторів — вітри, турбулентність і неоднорідність атмосфери.

Інфразвук, генерований випадковими природними джерелами. В науковій літературі вважається, що процеси, пов'язані із прольотом великих космічних тіл в атмосфері Землі, є одними з найбільш поширених природних джерел інтенсивного інфразвуку. У систематизованому вигляді результати таких досліджень опубліковані у роботі [67] (2017 р.). Тут досліджено з використанням урядової системи інфразвукових станцій США деякі параметри зареєстрованих у хвильовій зоні інфразвукових сигналів, генерованих 78 болідами. Подано також глобальну базу даних інфразвуку болідів і визначено механізми, що відповідають за міжстанційні розкиди періодів інфразвукового сигналу (останні призводять до великих відхилень оцінок енергії джерела). Проведений аналіз показав, що висота джерела інфразвуку лише незначно впливає на дисперсію виміряних періодів інфразвукового сигналу, тоді як відстань від джерела до вимірювальної станції, а також шум останньої відіграють значно більшу роль.

У цій же роботі [67] представлено незвичний підхід до оцінювання енергії болідів. Поки що цей підхід є дискусійним, однак він пропонує методику емпіричного оцінювання частоти появи і ефективної порогової енергії болідних ударних хвиль, які створюють на поверхні Землі надлишковий тиск Δp , достатній для пошкодження стандартних вікон. У результаті його застосування отримано такі оцінки:

1) при ймовірності поломки вікон від 0.4 до 7 % ефективна порогова енергія становить 5... 10 кт ТНТ (1 кт ТНТ = 4.185 \cdot 10¹² Дж), що відповідає $\Delta p > 500$ Па, і у глобальному масштабі такі явища відбуваються один раз на один-два роки;

2) події, які відповідають ймовірності пошкодження вікон від 0.01 до 0.7 % і $\Delta p > 200$ Па, очікуються кожні 600 років;

3) очікувана частота болідних ударних хвиль, що спричинюють значні пошкодження вікон у міських районах, становить один раз на кожні 5000 років. Тому найбільші щорічні болідні події, якщо вони відбудуться над великим міським центром, можуть призвести до значного пошкодження великої кількості вікон. Статистика падіння космічних тіл метрових розмірів детально досліджена в роботах [34, 38].

У ряді недавніх публікацій викладено результати досліджень особливостей поширення в атмосфері і параметрів інфразвуку, генерованого відомими метеороїдами та вулканами, зокрема *Тунгуським метеороїдом* (30.06.1908 р.) [41, 57, 95], *Індонезійським метеороїдом* (08.10.2009 р.) [42, 54], Челябінським метеороїдом (15.02.2015 р.) [33, 40, 55], Румунським метеороїдом (07.01.2015 р.) [53], Липецьким метеороїдом (21.06.2018 р.) [35], а також виверженням вулкану Св. Гелени [39, 60, 88]. Досліджувались кореляційні поля «відстань амплітуда тиску», апроксимаційні залежності амплітуди тиску від відстані, моделі загасання амплітуди хвилі, оцінки коефіцієнта загасання, параметри інфразвукових хвиль (амплітуда, швидкість поширення, спектральний склад, тривалість). Деякі результати цих досліджень, які стосуються безпосередньо виміряних параметрів інфразвукових хвиль, генерованих метеороїдами, у систематизованому вигляді наведено у табл. 1.

Звернемо увагу, що не у всіх подіях були проведені вимірювання, які б дозволили отримати оцінки параметрів інфразвукових хвиль. Тому достовірно можна оцінювати лише діапазон зміни параметрів інфразвукових хвиль за відомих умов їхнього вимірювання та інформації, що характеризує сам об'єкт і процес генерації.

Аналіз результатів цих досліджень дозволив зробити ряд якісних висновків.

1. Залежність амплітуди інфразвукової хвилі від відстані не піддається апроксимації про-

Джерело			Параметри генерованої атмосферної акустичної хвилі				
Джерело, дата	Енергія (ТНТ); Швидкість, км/с; Тривалість дії, с	Розмір, м; Висота, км	Тип хвилі	Відстань, км	Середній період, с	Середня тривалість, с	Середня швидкість, м/с
Тунгуський метеороїд (30.06.1908)	1050 Мт 1730 ~1	17 610	ударна, інфразвукова	>10 ⁵	20550	~1000	~ 300
Челябінський метеороїд (15.02.2015)	440.0±18.5 кт 18.5 3601800	18 23.3	ударна, інфразвукова	15150	10100	3601800	272.9±10
Індонезійський метеороїд (08.10.2009)	70±20 кт 19.2 ~1	810 19.1	ударна, інфразвукова		715	1660540	297
Румунський метеороїд (07.01.2015)	9401100 ГДж (у ближній зоні) >35 ~1	1.15 45.5	ударна, інфразвукова	531423	110	1660540	280
Вулкан Св. Гелени (07.01.2015)	(714) Mt 300 4440	~10 2.549	ударна, інфразвукова		100300	~1000	~ 300

Таблиця 1. Параметри деяких випадкових природних джерел інтенсивних інфразвукових коливань в атмосфері



Рис. 2. Залежність енергії E, яка вивільняється при зіткненні метеороїда з атмосферою, від частоти f акустичної хвилі, що при цьому генерується

стими співвідношеннями і поясненню процесу поширення хвилі на глобальні відстані фізично достовірними механізмами.

2. Найкращі апроксимації базуються на моделях поширення інфразвукових хвиль з циліндричною або сферичною розбіжністю фронту у хвилеводах «Земля — стратосфера» і «Земля термосфера».

3. Залежність «час запізнення — відстань» є лінійною.

4. Є стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним і дійсним азимутами джерела інфразвукового сигналу, а також між періодами коливань і амплітудами, обчисленими за двома методиками.

Для подальшого оцінювання необхідної енергетики наземного випромінювача доцільно оцінити рівень енергії вибухів метеороїдів. При аналізі енергії E_a вибуху метеороїда, що вивільняється при його зіткненні із щільними шарами атмосфери, враховують, що ця енергія залежить від розмірів метеороїда та передається генерованій ударній хвилі радіуса R_0 , яка при поширенні трансформується в акустичну хвилю частоти f_0 [62, 89]:

$$R_0 = \left(\frac{E_a}{p_0}\right)^{1/(\alpha+1)}, \quad f_0 = \frac{v_s}{2.81R_0},$$

де p_0 — атмосферний тиск, α — коефіцієнт (для сферичної хвилі $\alpha = 2$), v_s — швидкість звуку.

Орієнтовні значення величини енергії, яка необхідна для утворення ААХ у верхній частині інфразвукового діапазону (1...30 Гц) при зіткненні метеороїда із щільними шарами атмосфери, представлено на рис. 2. Ці розрахунки проведено для значень $f_0 = 1...30$ Гц, $p_0 = 101325$ Па (1 атм), $v_s = 340$ м/с.

Інфразвук, генерований рукотворними джерелами вибухового типу. Серед рукотворних джерел інтенсивного інфразвуку найчастіше досліджували потужні наземні дослідницькі або випадкові вибухи арсеналів зброї. Ці джерела інфразвуку є одним із інструментів фізичного моделювання передачі енергії в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера» [1]. Одним із найбільш відомих є експеримент МАССА, проведений у 1982 р. Тротиловий еквівалент цього вибуху дорівнював 360 т ТНТ, а його результати систематизовано в роботах [4, 5] і частково наведено у табл. 2.

Під час експерименту були проведені наземні та супутникові спостереження реакції іоносфери, які забезпечували вісім пунктів наземних спостережень з давачами тиску, розташованими на різних відстанях R = 1.4...2000 км від епіцентру вибуху. Проведено також радіозондування іоносфери до F-області на висотах H = 245...350 км. За результатами спостережень на різних висотах Н було оцінено такі параметри реакції іоносфери, як амплітуда, тривалість, форма та допплерівський зсув частоти, а також функцію передачі ААХ реальною атмосферою. Це дозволило вперше прослідкувати процес поширення ААХ, спричиненої вибухом, від місця її зародження до місць реєстрації у всіх пунктах на всіх радіотрасах і різних *R*.

За результатами експерименту зроблено висновки про спричинені вибухом іоносферні ефекти і особливості поширення ААХ, які свідчать про виявлення трансформації ААХ від вибуху на поверхні Землі в різні типи збурень іоносфери.

1. Поширення ААХ відбувається у приземному хвилеводі висотою $H_{\rm xB} \approx 2$ км на відстані до $R \approx 200$ км.

2. Багатострибкове, зокрема наддалеке поширення ААХ спостерігається в шарі $H_{\rm XB} = 0...50$ км на відстані від $R \approx 200$ км до $R \approx 2100$ км.

3. Виявлено відбиття інфразвукових хвиль від шарів на $H \approx 50$ і 100 км.

4. Ефективна тривалість початкового імпульсу при його поширенні до висот $H \approx 100$ км збіль-шується.

5. Верхнім шарам атмосфери властиве нелінійне поширення ААХ.

6. Встановлено генерацію ВГХ під час вибуху.

7. На відстані $R \approx 10^3$ км від місця вибуху виявлено збурення концентрації електронів іоносферної плазми двох типів:

• збільшення перерізу розсіяння іоносферної плазми, яке асоціюється з МГД-хвилями, у сім разів на першій хвилині після вибуху на висотах H = 100...400 км і з максимумом на шостій хвилині, що відповідає швидкості поширення збурення $v_{36} \approx 100$ км/с;

• квазіперіодичні варіації концентрації електронів і температури, які асоціюються з ВГХ, через 1 год після вибуху на висотах $H \ge 300$ км, що відповідає $v_{36} \approx 0.8$ км/с.

8. Вперше зареєстровано солітони в іоносферній плазмі, про що свідчить поява на 280-й секунді магнітного імпульсу тривалістю 0.08 с у *F*-області і альвенівського імпульсу на $H \approx 800$ км.

9. Виявлено турбулентність плазми при поширенні електромагнітного імпульсу великої амплітуди в іоносфері з утворенням «турбулентного сліду».

10. Одночасно з альвенівським імпульсом генерується шумова пляма електростатичної НЧтурбулентності в діапазоні 50...5000 Гц внаслідок збудження іонно-звукової або іонно-цикло-тронної нестійкостей.

11. Відбувається зміна фазово-амплітудних характеристик радіотрас над епіцентром вибуху.

У ряді публікацій наведено також результати досліджень параметрів інфразвуку, генерованого випадковими техногенними подіями, зокрема масовими вибухами на арсеналах боєприпасів [37, 43, 52, 53]. В останній час такі події відбулися, наприклад, на арсеналах поблизу м. Калинівки Вінницької області 26/27 вересня 2017 р. та поблизу міста Ічня Чернігівської області впродовж 9/10 жовтня 2018 р. Для дослідження особливостей дальнього поширення надширокосмугових інфразвукових сигналів і їхніх параметрів (хвильові форми, амплітуди, спектральний склад) автори робіт [41, 43, 56] використали мережу мікробарографів, що дозволило організувати траси різної орієнтації протяжністю від 153 до 181 км за рахунок розташування мікробарографів на різних відстанях: 176 км (Кам'янець-Подільський, 4 канали), 153 км (Малин, 2 канали), 181 км (Балта, 1 канал). Реєстрували й обробляли інфразвукові сигнали в діапазоні частот $f_{e} = 0.003...12$ Гц і тисків 0.01...100 Па на основі такої методики: реєстрація часових залежностей тиску у відносних одиницях; переведення в абсолютні одиниці; фільтрація в діапазоні періодів $T_{s} = 0.2...10$ с; віконне перетворення Фур'є відфільтрованих часових залежностей тиску; адап-

Таблиця 2. Параметри деяких випадкових і спланованих техногенних джерел інтенсивних інфразвукових коливань в атмосфері

Тип і параметри джерела			Параметри генерованої атмосферної акустичної хвилі				
тип джерела, дата	енергія (ТНТ)	висота, км	тип хвилі	відстань, км; тип поширення	середній період, с	середня три- валість, с	середня швид- кість, м/с
Вибух боєприпасів, Калинівка, Вінницька обл. (26/27.09.2017)	2.654 т	— наземний	ударна, інфразву- кова	153181 одно- і багато- променеве	0.62.4	60120	300309
Вибух боєприпасів, Ічня, Чернігівська обл. (9/10.10.2018)	440.0±18.5 кт	~100 наземний	інфразву- кова	218 одно- і багато- променеве	0.51.5	57	320340
Вибух, науковий проект МАССА (1982)	360 т	— наземний	ВГХ, МГД, інфразву- кова	1.42000 приземне, багатострибкове	~10	~100	~300

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2



Рис. 3. Кількісні оцінки параметрів інфразвукових сигналів, згенерованих метеороїдами (N — номер джерела інфразвуку у табл. 1): a — період T, δ — середня швидкість V_s поширення коливань, s — тривалість T_i імпульсу. Квадратики і трикутники — максимальні значення параметрів, ромбики — мінімальні

тивне перетворення Фур'є; вейвлет-перетворення з використанням базисної функції Морле.

Висновки за результатами дослідження такі.

1. Амплітуда цугу і період коливань зменшуються при зменшенні енергії вибухів.

2. Тривалість цугу коливань $\tau_s = 1...2$ хв, причому немає чіткої її залежності від енергії вибухів.

3. Часова залежність тиску не є монотонною.

4. Спектр містить складові з періодами $T_s = 0.6...2.4$ с.

5. Коефіцієнт широкосмуговості становив 0.8...1.2.

6. Поширення вздовж трас є однопроменевим і багатопроменевим.

7. Максимум енергії відповідає періодам $T_s = 1...2$ с.

8. Енерговиділення складає 2.6...54 т ТНТ.

Досить висока наукова цінність використання вибухових методів для дослідження явища штучної AMI значною мірою нівелюється їхнім негативним впливом на стан екологічної безпеки навколишнього середовища та слабкою керованістю процесом генерації інфразвуку. Це стимулювало дослідників створювати інші джерела акустичних збурень, екологічно безпечніші та з вищою керованістю параметрів. Але на основі літературних джерел поки що важко визначити повною мірою технічні вимоги до такого типу керованих джерел інфразвуку, які б забезпечили можливість їхнього використання для дослідження явища АМІ. Це пояснюється неповнотою наявних даних про генерацію інфразвуку випадковими природними та рукотворними джерелами, складністю та багатогранністю фізичних ефектів, недостатньою номенклатурою вимірювальної інфраструктури, випадковістю та швидкоплинністю зміни стану іоносфери і параметрів джерел інфразвукових хвиль.

Для формування адекватних вимог до наземного акустичного випромінювача, який може здійснити достатній енергетичний вплив на іоносферу, доцільно порівняти інфразвук, генерований підчас під час падіння боліда, з наземними тестовими вибухами. В роботі [62] проаналізовано сигнальні властивості акустичних хвиль на інфразвукових частотах, які генерують метеороїди діаметром 0.1...10 м і які модифікують стан середовища атмосфери Землі. Отримано серію емпіричних зв'язків між акустичною сигнатурою поля у хвильовій зоні болідних ударів (максимальна амплітуда обвідної сигналу, амплітуда від піку до піку, загальна інтегрована енергія сигналу та інтегральне співвідношення сигнал/шум після корекції на висотний вітер) і кінетичною енергією боліда.

Порівняння параметрів інфразвукових коливань, генерованих болідами і наземними вибухами, показало, що амплітуди ААХ, генерованих малими болідними подіями з енергією менше 7 кт ТНТ, послаблюються швидше, ніж амплітуди ААХ, генерованих ядерними або хімічними вибухами. Крім того, значення акустичної амплітуди систематично є нижчим для болідів, ніж для еквівалентних наземних вибухів. Це пояснюється тим, що генерація інфразвуку болідами в атмосфері здійснюється на висотах H > 20...30 км. Для інфразвукових хвиль, генерованих малими болідами, встановлено, що при визначенні відношення інтегральної енергії вибуху боліда до потужності сигналу коефіцієнт коригування вітру майже удвічі більший, ніж у випадку незалежно вимірюваної амплітуди сигналу. Аналогічна поведінка очікується і для зв'язку між параметрами «енергія вибуху — акустична амплітуда». В той же час, за даними роботи [62], корекція даних вітру для «великих» болідів з енергією понад 7 кт ТНТ є незначною. Вона припускає середню висоту детонації боліду *H* = 20...30 км для малих подій з енергією менше 7 кт ТНТ і висоту $H \sim 20$ км для подій з енергією більше 7 кт ТНТ. Однак у цих дослідженнях не враховано вплив нелінійних ефектів.

Проведено також порівняння спостережуваних періодів інфразвукового сигналу боліду на основі відношення АFTAC «енергія вибуху — пе*ріод сигналу*», яке отримують за даними ядерних випробувань, на додаток до допплерівського зсуву сигналу, зумовленого висотними вітрами. Саме цей ефект значно зменшує ймовірність визначення відношення АFTAC «енергія — період». Підвищення ж ймовірності вимагає значних обчислювальних зусиль і застосування повних глобальних моделей атмосферного вітру, наявного під час окремих подій. Враховуючи наведене вище, в роботі [59] встановлено, що для болідів некоректоване відношення АFTAC «енергія вибуху — *nepiod сигналу*» після регресії не показує кращої кореляції (коефіцієнт кореляції $R \approx 0.478$), ніж більшість інших досліджених властивостей інфразвукових сигналів. Встановлено також факт переоцінки енергії джерела (у деяких випадках на кілька порядків) для енергій понад 7 кт ТНТ у випадках її визначення супутниковими спостереженнями і на основі залежності АFTAC. Зроблено припущення, що це є наслідком великомасштабної фрагментації масивних метеороїдів у атмосфері та відповідного утворення штучної великої колективної доменної порожнини, що генерує більш тривалі періоди інфразвукових хвиль. За результатами згаданих досліджень зроблено висновок, що відношення АFTAC «енергія — період» є розумним засобом оцінювання енергії болідних подій у діапазоні від 0.1 до декількох кт ТНТ.

Враховуючи результати згаданих вище досліджень генерації інфразвуку метеороїдами, у табл. 1 і на рис. З наведено лише ті параметри інфразвукових хвиль і діапазони зміни їхніх значень, які реєстрували під час експериментів і результати аналізу яких необхідно врахувати при створенні випромінювача типу НКАВ: період інфразвукових коливань T_{inf} , тривалість інфразвукового імпульсу τ_{imp} і швидкість поширення інфразвукових хвиль v_e .

НЕВИБУХОВІ ЗАСОБИ ШТУЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ НАВКОЛОЗЕМНОГО СЕРЕДОВИЩА

Наземні акустичні випромінювачі. Дослідження акустичного каналу системи «літосфера — ат*мосфера — іоносфера*» і процесів акустичної модифікації середовища навколоземного простору вимагає застосування наземних акустичних випромінювачів, які можуть забезпечити багатократне повторення експериментів з керованими параметрами випромінювання ААХ з поверхні Землі. Акустичні випромінювальні комплекси такого класу вперше застосували для радіоакустичного зондування атмосфери [10, 77, 79]. Наприклад, в експерименті «*Сура-sound*» (Росія, 2003—2004 рр.), акустичний випромінювач забезпечував генерацію в діапазоні частот (17...24 Гц за схемою «сирена — рупор» при дослідженні тропосфери на висотах H < 1...10 км та мезосфери на висотах H = 60...90 км. Ще один приклад вібросейсмічне зондування атмосфери на висотах H = 1...3 км потужним сейсмовібратором.

В Україні для проведення експериментів зі штучної керованої акустичної модифікації навколоземного середовища в 1991 р. були створені і використовуються на даний час потужні випромінювачі типу НКАВ (розробка ЛЦ ІКД за участі ФМІ), а також сучасні засоби реєстрації та обробки даних цих експериментів, такі як декаметровий радіотелескоп (РТ) УРАН-3 (ФМІ), іоносферні станції та радари Інституту іоносфери НАН та МОН України і ХНУ ім. В. Н. Каразіна. При опрацюванні вимірювань використовуються й супутникові дані. Для досліджень створено ряд модифікацій НКАВ: стаціонарні низькочастотні НКАВ параметричного типу, які



Рис. 4. Залежність величини енергії E, яка вивільняється під час генерації основних акустичних хвиль наземним керованим акустичним випромінювачем параметрично-го типу, від частоти f генерованих основних акустичних хвиль

забезпечують генерацію інфразвукових хвиль в діапазоні частот 1...10 Гц; стаціонарні високочастотні НКАВ ротаційного типу, які забезпечують генерацію інфразвуку в діапазоні частот (10...30 Гц; мобільний високочастотний НКАВ, змонтований на шасі автомобіля, що забезпечує генерацію інфразвуку на частотах понад 10 Гц. Стаціонарні НКАВ розташовані на території ЛЦ ІКД у м. Львові, а мобільний комплекс розташовувався в різних місцях — на території ЛЦ ІКД (Львів) та полігоні Інституту іоносфери НАН та МОН України (Харків).

Залежність величини енергії, необхідної для генерації НКАВ двох основних частот $f_0 = 600...$ 630 Гц в режимі параметричного випромінювача, від величини цих частот приведено на рис. 4. Для розрахунків використано ті ж параметри, що й для визначення частоти інфразвуку, генерованого метеороїдами при їхньому входженні в атмосферу (рис. 2), окрім $f_0 = 600...630$ Гц і $v_s =$ = 420 м/с. Порівняння енергетичних характеристик джерел випромінювання інфразвуку (природних — метеороїдів і штучних — типу НКАВ) показує, що вони різняться на декілька порядків.

Для дистанційного і контактного зондування іоносфери з метою дослідження ефектів штучної АМІ використовували таке обладнання:

• радіофізичні комплекси ФМІ (Шацьк) на базі РТ УРАН-3, зокрема іоносферно-діагно-

стичний комплекс і мініінтерферометр з базою, яка дорівнює відстані між двома половинами антени радіотелескопа [7, 73];

• радіофізичні комплекси Інституту іоносфери НАН та МОН України та ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків), зокрема радар некогерентного розсіяння, допплерівський радар, радар часткових відбиттів, іоносферна станція «Базис»;

• вимірювачі параметрів інфразвукового, геоелектричного та геомагнітного полів, атмосферного струму, параметрів дуже низькочастотних (ДНЧ) радіосигналів, кліматичних параметрів на всіх полігонах;

• спеціальні радіостанції короткохвильового (КХ) діапазону, КХ-станції радіомовлення;

• бортові комплекси супутників DEMETER (Франція) і CHIBIS (Росія, Угорщина), які використовували для проведення експериментів під час прольотів супутників в околі місця розташування НКАВ [8, 9, 21, 74, 82, 87, 94].

У даній роботі із багатьох експериментів, проведених на основі цього обладнання впродовж 1991—2018 рр. різними радіофізичними методами та схемами (рис. 5), виділено наступні чотири серії:

1) 1996—1998 рр. (стаціонарний низькочастотний НКАВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк)) і 2001—2005 рр. (стаціонарний високочастотний НКАВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк));

2) 2005—2006 рр. (мобільний високочастотний НКАВ (ЛЦ ІКД, полігон Інституту іоносфери НАН та МОН України, Харків) — радіофізичні комплекси Інституту іоносфери НАН та МОН України і ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків) — супутник DEMETER);

3) 2013—2014 рр. (стаціонарний високочастотний НКАВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк) супутник CHIBIS);

4) 2018 р. (удосконалений стаціонарний низькочастотний НКАВ (ЛЦ ІКД, Львів) — удосконалений іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк)).

Вплив наземних акустичних збурень на середовище навколоземного простору. Фізичні процеси



Рис. 5. Схеми експериментів із дослідження ефектів штучної акустичної модифікації середовища навколоземного простору з використанням іоносферно-діагностичного комплексу УРАН-З (Шацьк) і стаціонарного акустичного випромінювача (Львів) радіоастрономічним методом (a, δ), методом слабонахиленого зондування іоносфери (a), методом розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях іоносфери (z)

взаємодії ААХ, генерованих НКАВ, з навколоземним середовищем на різних висотах відрізняються. Тому прояви акустико-електромагнітної взаємодії у різних компонентах цього середовища, фізичні моделі, які їх описують, та фізичні механізми, за допомогою яких літосферно-іоносферні зв'язки реально реалізуються, теж можуть бути різними. У роботі [78] зауважено, що «неможливо виокремити лише одну модель і відкинути інші моделі, оскільки характерні просторові масштаби ефектів, що спостерігаються в іоносфері до землетрусів, коливаються від 200 до 300 км до декількох тисяч кілометрів, а характерні часи змінюються від декількох хвилин до декількох днів». Наприклад, в літературних

збудження геоелектричного контуру «поверхня Землі — атмосфера — іоносфера» на малих висотах H = 0...10 км в діапазоні частот від сотен герц до десятків мегагерц [78]; свічення в інфрачервоному діапазоні за рахунок хімічних реакцій руйнування озону на висотах 20...30 км [20]; модель Гальперіна — Хаякави, яка передбачає, що коли акустична хвиля доходить до висот H = 50...60 км, має місце електропробій проміжку «іоносфера — фронт акустичної хвилі», і внаслідок електричного розряду з'являються електромагнітні відгуки у широкому діапазоні частот, які можна реєструвати як в іоносфері, так і на поверхні Землі [15, 65, 66] тощо.

джерелах запропоновано і аналізуються моделі:



Рис. 6. Можливі резонансні структури в системі «атмосфера — магнітосфера»: *а* — іоносферний альвенівський резонатор, *б* — поперечний шуманівський резонатор

За результатами наземних і супутникових спостережень впродовж 1996—2018 pp. реакцій різних шарів навколоземного простору на дію акустичного збудження невибухового характеру, генерованого з допомогою НКАВ, можна зробити такі висновки.

1. Спостерігаються практично всі ефекти, зареєстровані під час вибухових досліджень [11— 16, 19, 65, 66, 77, 87, 94]: акустико-магнітні, акустико-електричні, вплив на радіохвилі в ультрависокочастотному (УВЧ), високочастотному (ВЧ) і ДНЧ-діапазонах, вплив на прозорість іоносфери в УВЧ- і ВЧ-радіодіапазонах [70—72, 74], акустико-оптичні, збурення концентрації електронів іоносферної плазми.

2. Найбільш чутливими до впливу акустичних збурень виявилися просторово-резонансні структури, які формуються завдяки просторовій неоднорідності властивостей навколоземного середовища, і взаємодія ААХ з якими локалізує вплив на нього акустичного збурення (рис. 6): поперечний шуманівський резонатор («поверхня Землі — атмосфера — іоносфера»), іоносферний альвенівський резонатор («іоносфера — область різкої зміни швидкості альвенівських хвиль»), магнітосферний альвенівський резонатор, утворений нижньою межею іоносфери у спряжених областях магнітної силової трубки.

3. Є ефекти, які не спостерігались (або рідко спостерігались) під час експериментів з вибухами. Деякі приклади відповідних експериментальних записів наведено на рис. 7 [6]: збільшення кількості свистових атмосфериків — періодичних і випадкових послідовностей імпульсів свистових випромінювань, які під час вибухів не виявлялися (рис. 7, в); переміщення іоносфер*них шарів* E, F_1, F_2 за рахунок впливу акустичних збурень (рис. 7, д, е); підвищення індекса прозорості для електромагнітних хвиль, які поширюються крізь рухому акустично збурену періодичну структуру в іоносфері, що багатократно спостерігали (з 1997 р.) в експериментах ФМІ — ЛЦ ІКД [11—15, 70—72, 74] та формування періодичних резонансних структур у діапазоні 1... 40 Гц, які спостерігали у спільних (Франція — ЛЦ ІКД) експериментах із супутником DEMETER під час підвищеної сейсмічної активності [8, 9, 82, 94]; зміна рівня космічного шуму до та після дії акустичного збурення (рис. 7, б); локальні зміни природного геліообумовленого інфразвуку; локальні зміни опадів і вітру; варіації параметрів геомагнітного поля внаслідок появи струмів, що створюють магнітні пульсації (рис. 7, г).

Моделі акустико-електромагнітної взаємодії. Модель зміни прозорості іоносфери для космічного радіовипромінювання під впливом низь-



Рис. 7. Зміни параметрів сигналів, зареєстрованих супутником DEMETER (Франція) до, під час, після і без акустичного збудження (вертикальними штриховими лініями або стрілками позначено час початку збудження): a — сигнали навігаційної радіостанції на борту супутника DEMETER (вгорі — під час збудження, внизу — без збудження), δ — рівень космічного шуму до і після, a — густина вістлерів до (зліва) і після (справа), c — варіації геомагнітного поля до і після, d — динаміка зміни шарів F_1 та E_s 06.05.2006 р. після збудження в 11:12, e — динаміка зміни стану шарів F_1 та E_s 10.05.2006 р. після збудження в 11:35

кочастотної (НЧ) ААХ досліджено у спільних експериментах ФМІ — ЛЦ ІКД [11—15, 70—72, 74]. При цьому допускали, що ААХ, які досягають іоносфери, повинні мати частоти в діапазоні одиниць герц, оскільки більш високочастотні складові швидко розсіюються в навколоземному середовищі. У конструкціях НКАВ, розроблених в ЛЦ ІКД, цю складність подолано за рахунок використання параметричного ефекту. Останній проявляється при одночасній роботі двох потужних акустичних генераторів, які випромінюють дві близькі частоти, формуючи в дальній зоні інфразвукову хвилю на різницевій частоті.

В роботах [70-72, 74] розглянуто різні аспекти моделі акустико-електромагнітної взаємодії космічного радіовипромінювання із іоносферними неоднорідностями у вигляді періодичної структури концентрації електронів і можливості її використання для інтерпретації експериментів. Це відповідало умовам проведення експериментів радіоастрономічним методом зондування іоносфери. При цьому автори роботи [74] вважають, що внаслідок впливу ААХ в іоносфері формується рухома неоднорідність у вигляді періодичної структури концентрації електронів із періодом, що дорівнює довжині ААХ $\Lambda = v_s / f_s$, де v_с — швидкість звуку. У випадку моделювання іоносфери півнескінченною плазмою коефіцієнт проходження радіохвиль крізь цю неоднорідність описується виразом, який демонструє резонансний характер взаємодії. Для космічного радіовипромінювання з довжиною хвилі $\lambda = c/f$ (с і f — швидкість і частота радіохвиль) при λ = $= \Lambda/n, n = 1, 2, 3, ...$ (умова резонансу) коефіцієнт проходження швидко збільшується в діапазоні $\lambda = 10...100$ м, що демонструє можливість багатократного збільшення прозорості іоносфери, якщо Л дорівнює цілому числу довжин радіохвиль.

У цих же роботах значну увагу приділено моделям, які описують трансформацію ААХ, генерованих на поверхні Землі, при їхньому поширенні у стратифікованому середовищі навколоземного простору. Так, у роботі [72] шляхом математичного моделювання на основі рівняння теорії пружності проаналізовано нелінійний механізм перетворення сейсмічних НЧ-хвиль в наднизькочастотні ААХ (УНЧ). При аналізі враховано, що спектр сейсмічних хвиль, спричинений землетрусом, широкий, але до іоносфери доходять лише акустичні хвилі наднизької частоти. Моделювання показало, що у процесі літосферноіоносферної взаємодії мають місце два послідовних процеси, а саме — нелінійна взаємодія двох атмосферних ААХ низької частоти та відповідна трансформація цих хвиль у хвилі УНЧ на частоті перенесення. Вищеозначена модель нелінійного механізму перетікання енергії з літосфери в іоносферу додатково демонструє важливість акустичного каналу передачі енергії від літосфери до іоносфери під час сейсмічної активності.

У роботі [86] в рамках підготовки до активного експерименту з потужним наземним монохроматичним випромінювачем на модельному рівні досліджувалось явище модифікації іоносферної плазми інфразвуковими хвилями і теоретично вивчалась можливість збурення іоносфери акустичною хвилею на частоті 20 Гц і менше. Показано, що для того, щоб можна було спричинити акустико-іоносферні збурення в цьому випадку, потужність акустичного випромінювача повинна бути не меншою, ніж 10...100 кВт. Теоретичні моделі та чисельні розрахунки при цьому враховували реальну залежність температури від висоти, а модуляцію концентрації електронів на $H \approx 100$ км визначали з умови, що плазма є невеликою пасивною домішкою.

У роботі [70] розглянуто можливість збільшення прозорості атмосфери для космічного радіовипромінювання, зумовлену зменшенням концентрації електронів *F*-області іоносфери під дією акустичної хвилі УНЧ. Представлено також результати моделювання нелінійного частотного перетворення акустичних хвиль надзвичайно низької частоти (ННЧ) в акустичні хвилі УНЧ. При цьому моделювалося поширення збуджених УНЧ-хвиль у неізотермічній іоносфері та враховано підвищення прозорості іоносферної Г-області для космічних радіохвиль за рахунок модуляції концентрації електронів у плазмі. Автори підкреслили, що це явище відбувається одночасно зі збільшенням прозорості, спричиненим періодичною структурою акустичних ННЧ-хвиль в Е-шарі іоносфери, і що обидва явища були підтверджені експериментально раніше. Аналогічні висновки були зроблені в одній із останніх робіт цих же авторів [71], присвяченій цій проблемі, в якій стверджується, що генерування різних типів хвиль в атмосфері та іоносфері, спричинене сейсмічними діями та виверженням вулканів, змінює прозорість для космічних радіохвиль. Проаналізовано дві вищезгаданих моделі акустико-електромагнітної взаємодії. У першій ААХ стимулює утворення в іоносфері періодичної структури концентрації електронів, що зумовлює резонансне проходження радіохвиль, коли довжина акустичної хвилі дорівнює одній або кільком довжинам радіохвилі. У другій — AAX стимулює зниження концентрації електронів у *F*-області іоносфери, що призводить до збільшення прозорості іоносфери для космічних радіохвиль.

У роботі [75] розглянуто проблему генерації квазіперіодичних інфразвукових хвиль і оцінено їхній вплив на процес утворення акустикоіоносферних збурень концентрації електронів в іоносфері та на появу допплерівського зсуву частоти. Основну увагу у цій роботі було зосереджено на оцінюванні та порівнянні спектрів інфразвуку, випроміненого генераторами параметричного та пістонного типів, під час його поширення від поверхні Землі до іоносферних висот з урахуванням розбіжності хвильового фронту, нелінійних властивостей атмосфери та поглинання, а також на визначенні параметрів іоносферних збурень під дією інфразвуку.

У роботі [87] описано удосконалену модель поширення до іоносферних висот ААХ, згенерованих НКАВ параметричного типу, аналогічному розробленому в ЛЦ ІКД. Останній випромінює початкові основні частоти $f_1 = 600$ Гц і $f_2 = 625$ Гц з великими амплітудами (100... 420 мc^{-1}) і частотною модуляцією частотою 0.016 Гц кожної хвилі. Щоб забезпечити необхідні умови для вертикального поширення ААХ та їхнього проникнення на висоту іоносфери, у моделі покладено двоступеневе сильно нелінійне перетворення основних ААХ в акустичну хвилю з різницевою частотою $\Delta f = f_2 - f_1$ в діапазоні висот H = 0...100 м і трансформація акустичної хвилі різницевої частоти при її поширенні в межах висот H = 0.1...20 км в акустичну гравітаційну хвилю (АГХ) з частотною модуляцією, яка практично досягає висот іоносферних областей Е та F. Новизна запропонованої аналітично-чисельної моделі пояснюється тим, що вона одночасно враховує нелінійність, дифракцію, втрати, дисперсію та наявність вищеозначеного двоступеневого перетворення початкових ААХ в акустичну хвилю з різницевою частотою. Автори вважають, що сформовані АГХ можуть підвищити прозорість іоносфери для електромагнітних хвиль у діапазонах ВЧ (МГц) та ДНЧ (кГц). Ці результати є принципово важливими для моделювання впливу високоенергетичного випромінювання НКАВ на іоносферу. Розроблена у даній роботі теоретична модель використана для інтерпретації активних експериментів, які включали оцінку впливу енергетики НКАВ на систему «атмосфера — іоносфера», вимірювання електромагнітних та акустичних полів, дослідження змін іоносферної прозорості для радіовипромінювань від галактичних радіоджерел, оптичні вимірювання та оцінку впливу на атмосферні аерозолі. У цій же роботі показано відповідність отриманих теоретичних результатів щодо допплерівського зсуву частоти радіохвиль, які взаємодіють із штучними АІЗ, стимульованими дією НКАВ на іоносферу, та експериментальних результатів, отриманим раніше у роботах [7, 8, 9, 11-16, 19, 21, 74, 82, 92]. Запропонований підхід дозволяє краще зрозуміти механізм акустичного каналу сейсмо-іоносферного зв'язку.

У роботі [90] проаналізовано оригінальну модель поширення атмосферних хвиль із поверхні Землі з урахуванням реалістичного висотного температурного профілю в атмосфері. В рамках лінеаризованого рівняння теоретично досліджено формування вузької області з підвищеним тиском в резонансній області, де швидкість горизонтальної фази хвилі дорівнює швидкості звуку. Чисельне моделювання різних моделей профілів атмосферної температури та в'язкості підтвердили аналітичний результат для конкретних властивостей хвильових полів, зокрема формування вузької області з неоднорідностями плазми в областях D і E нижньої іоносфери, створених сингулярністю акусто-гравітаційних хвиль.

Модель впливу акустичних збурень, яка описує переміщення іоносферних шарів $E, F_1, F_2,$ досліджували у спільних експериментах ЛЦ ІКД, Інституту іоносфери НАН та МОН України та ХНУ ім. В. Н. Каразіна методом вертикального зондування іоносфери з використанням автоматичної іоносферної станції «Базис» на основі вимірювання критичної частоти та динаміки її зміни. Незважаючи на те що енергетика НКАВ недостатня для створення суттєвих змін у таких глобальних структурах, як шари Е, F₁, F₂, у ряді експериментів спостерігались певні зміни у структурі шарів нижньої іоносфери [6]. Наприклад, після включення НКАВ 6 травня 2006 р. о 11:12 різко збільшився ступінь розвитку шару F₁, який о 11:20 (через 8 хв) досяг максимуму (рис. 7, ∂ , e — по осі X відкладено час, а по осі Y — відносні значення критичної частоти для шарів E, E_s, F_2 і ступінь іонізації для F_1). Видно, що після дії акустичного збудження розрив між висотно-частотними характеристиками шарів F₁ і F₂ зріс і досяг максимуму в 11:20. Це свідчить про утворення міжшарової впадини F₁ - F₂. З 11:25 цей розрив і, відповідно, розрив міжшарової впадини F₁ – F₂ поступово зникає. В цей же день при повторному включенні НКАВ о 14:30 спостерігали протилежний ефект. Розрив між висотно-частотними характеристиками шарів $F_1 - F_2$ змінився і почав зменшуватись (рис. 7, е). О 14:44 він досягнув мінімуму, та після 14:45 почав повертатися до попереднього значення. Відзначимо, що в цих експериментах протилежно змінювалися і варіації геомагнітного поля в діапазоні 1...40 Гц (рис. 7, г). В 11:12 включення НКАВ призвело до різкого зростання цих варіацій, а в 14:30 — до різкого падіння. Пояснення цього ефекту поки що немає.

Методологія і обладнання для дослідження процесів штучної акустичної модифікації іоносфери. Запропонована методологія ґрунтується в основному на можливостях наявних у ФМІ та ЛЦ ІКД інструментальних засобів. Вона передбачає використання різних методик і обладнання для реалізації акусто-електромагнітного зондування іоносфери, розроблення інформаційних технологій ідентифікації АІЗ та інтерпретації можливих фізичних механізмів акустико-іоносферної та акустико-електромагнітної взаємодії.

<u>Стаціонарний НКАВ</u>, в якому використано ефекти параметричної взаємодії, модуляції надзвукового потоку повітря та формування періодичної послідовності ударних хвиль, забезпечує такі параметри генерації: потужність електроприводу $P_e \approx 150$ кВт; випромінена акустична енергія 1.8 МДж (при роботі НКАВ впродовж 60 с); основні частоти випромінювання — 100 Гц і 110 Гц або 600 і 630 Гц; різницева частота $f_p =$ = 1...10 Гц або $f_p \approx 30$ Гц; тиск ААХ на відстані 1 м — 165 дБ; спектр поля на зрізі рупорів — лінійчатий дискретний; маса — 2 т; габарити — $2.5 \times 1.5 \times 1.5$ м³.

<u>РТ УРАН-3</u>, основні параметри якого: декаметровий діапазон радіохвиль 4...30 МГц; антена містить 256 вібраторів з двома поляризаціями; площа антени становить 14400 м², а ефективна площа — 4320 м² на частоті f = 25 МГц та 5760 м² на частоті f = 16.7 МГц; коефіцієнт корисної дії приблизно дорівнює 0.3 на f = 25 МГц і 0.4 — на f = 16.7 МГц; кути променя діаграми спрямованості складають 3.5° × 15° відповідно в напрямках Сх-Зх і Пн-Пд, сканування діаграмою спрямованості по схиленню і азимуту; можливість електричного керування відхиленням від зеніту $\gamma \approx$ $\approx \pm 70^\circ$, де χ — часовий кут схилення; чутливість складає $I \approx 50$ Ян \cdot Вт/(м² \cdot Гц) на f = 25 МГц у частотній смузі $\Delta f = 14 \, \mathrm{kFu}$; похибка вимірювання потоку $\delta_1 \approx 15 \%$ при відношенні *сигнал/шум* = 1:10; канали прийому, реєстрації і обробки прийнятих сигналів — два радіоінтерферометричних і два радіометричних, калібрування, комп'ютерної обробки, відображення; реєстровані параметри потужності сигналів P_A і P_B кожної поляризації, модуль взаємно кореляційної функції $|r_{12B}(t)_{s,c}|$ сигналів кожної половини антени, амплітуда завмирань A і допплерівський зсув частоти F_{d} сигналів. Для проведення експериментів на базі радіотелескопа УРАН-3 створено ряд радіофізичних засобів [73]: іоносферно-діагностичний комплекс, мініінтерферометр із базою D = 100 м, короткобазовий радіоінтерферометр на шасі автомобіля ЗІЛ-151 зі змінною базою D = 0...40 км, в якому використано розбірну 16-елементну антену і блок ретрансляції сигналів.

<u>Методи</u> дистанційного зондування іоносфери, які були застосовані для дослідження процесів штучної АМІ з використанням НКАВ (рис. 5): а) радіоастрономічний, в якому використовується радіовипромінювання дискретних космічних джерел і галактичного тла), б) слабонахиленого радіозондування іоносфери, в) об'ємного розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях іоносфери.

Методологія зондування враховує:

а) прогнозовану відносно низьку енергетику відгуку іоносфери на дію акустичного збудження, генерованого НКАВ, і очікувані низькі рівні значення відношення *сигнал / завада*;

б) інформаційні особливості іоносферних сигналів, сформованих в результаті проявів акустоелектромагнітної взаємодії в іоносфері: *трансмісійного* у радіоастрономічному методі, *відбитого* у методі слабонахиленого зондування, *розсіяного* у методі об'ємного розсіяння;

в) необхідність використання різних радіофізичних методів діагностики AI3 завдяки різноманітності проявів акусто-електромагнітної взаємодії;

г) необхідність застосування декількох режимів роботи НКАВ — однократного, багатократного (рівномірного або нерівномірного), одночастотного, з регульованою різницевою частотою, тощо.

Запропоновано методики дослідження процесів штучної АМІ.

1. Методики № 1 (рис. 5, *a*) і № 2 (рис. 5, *б*), в яких використано радіоастрономічний метод і радіовипромінювання дискретних космічних радіоджерел — 3С10, 3С84, 3С123, 3С134, 3С144, 3С218 та інших, ефект радіомерехтінь, технологію оцінювання статистичних характеристик інтенсивності, поляризаційну вибірковість.

2. Методика № 3 (рис. 5, б), в якій використано радіоастрономічний метод, радіовипромінювання дискретних космічних радіоджерел та галактичного тла, радіоінтерферометричні вимірювання з допомогою мініінтерферометра.

3. Методика № 4 (рис. 5, *в*), в якій використано метод слабонахиленого зондування, іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3, КХ-радіостанції, реєстрацію рухомих іоносферних збурень на односкачковій трасі «КХрадіостанція — радіоінтерферометр УРАН-3» та визначення їхніх параметрів на основі даних про флуктуації траєкторних параметрів дзеркально відбитих іоносферних сигналів, зокрема кута приходу та допплерівського зсуву частоти.

4. Методика № 5 (рис. 5, *г*), в якій використано метод об'ємного розсіювання, КХ-радіостанції, дві половини антени радіотелескопа УРАН-3 по двох поляризаціях, вимірювання амплітудно-поляризаційно-часових залежностей рухомих іоносферних збурень на робочих частотах $f_p > f_{\rm M34F2}$, де $f_{\rm M34}$ — максимально застосовна частота.

Аналіз результатів досліджень явища штучної АМІ, виконаних на основі згаданих вище методик дистанційного зондування іоносфери та наземного і космічного обладнання, дозволив зробити такі висновки.

1. Вперше експериментально підтверджено достатність енергетики випромінювача типу НКАВ, створеного ЛЦ ІКД, для реалізації штучної, керованої з поверхні Землі, акустичної модифікації різних шарів навколоземного середовища, зокрема й іоносфери.

2. Одержано якісні та кількісні оцінки інформаційних характеристик іоносферних радіосигналів, придатні для застосування інформаційних технологій виявлення й ідентифікації AI3 наземного акустичного походження.

3. У більшості наземних експериментів наявні реакції іоносфери на дію акустичного збудження з характерними часами затримки $T_s \approx 5, 20, 40$ хв.

4. Супутникові спостереження підтвердили адекватність моделі модуляції прозорості іоносфери для радіовипромінювання ДНЧ-діапазону, а також гіпотези про подібність реакцій іоносфери на акустичні збудження сейсмічного та штучного походжень.

5. За результатами аналізу поширення акустичних хвиль у системі «Земля — атмосфера іоносфера» та частотних характеристик хвильових процесів в іоносфері встановлено, що для частот $f_s \approx 30$ Гц адекватними є моделі збурення іоносферного альвенівського резонатора та модуляції прозорості іоносфери, зокрема і для ДНЧ-радіодіапазону, а для частот f < 10 Гц — модель збурення E- і F-шарів.

6. В експериментах із застосуванням радіоастрономічного методу при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *трансмісійних* іоносферних сигналів встановлено:

а) перша реакція іоносфери реєструється через $\tau_3 \approx 5...6$ хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі, що із врахуванням середньої швидкості висотного поширення ААХ відповідає часові її поширення до іоносферних висот; перша реакція супроводжується розширенням спектру сигналу, а опис її моделі відповідає зміні прозорості іоносфери для космічних радіохвиль при вертикальному поширенні ААХ крізь іоносферу;

б) повторні реакції іоносфери із затримками $\tau_3 \approx 10, 20, 30, 40$ і 60 хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі теж мають розширений частотний спектр і вищі амплітуди, що відповідає процесу поширення різних типів акустико-плазмових хвиль в іоносфері з різними швидкостями, причому найбільш стабільна та інтенсивна реакція має затримку $\tau_3 \approx 40$ хв;

в) для виявлення AI3 рекомендовано такі інформаційні параметри радіосигналів, зареєстрованих при скануванні космічних радіоджерел: часові співвідношення між іоносферними збуреннями, гранична частота $F_{\rm rp}$ розширення частотного спектру, залежності відносного зсуву фаз на фіксованому відрізку часу.

7. В експериментах із застосуванням методу слабонахиленого зондування при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *відбитих* іоносферних сигналів встановлено:

а) збільшення амплітуди сигналів із затримкою $\tau_3 = 11...13$ хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі;

б) зміну форми автокореляційної функції (АКФ) сигналів тривалістю 1 хв, а саме — при відсутності акустичного збудження вигляд АКФ є плавно загасаючим, а при його наявності — коливний і швидко загасаючий;

в) зміни в допплерограмах сигналів, зокрема з затримкою $\tau_3 \approx 32$ хв після початку акустичного збудження, що полягають у коливанні параметрів допплерівського зсуву частоти сигналу з наростаючою амплітудою в діапазоні частот $f_{\pi} = 0.5...1.0$ Гц і періодів $T_{\pi} = 15...16$ хв;

г) появу двомодовості ў відбитих сигналах із рознесенням мод у межах 0.2...0.4 Гц;

д) вірогідну модель для опису процесу акустико-електромагнітної взаємодії — коливання *E*- і *F*-шарів іоносфери, обумовлені дією НЧ ААХ;

 е) кореляцію дисперсії флуктуацій кута нахилу еліпса поляризації відбитого сигналу з початком акустичного збудження, причому акустично модифікованій іоносфері відповідає зменшення флуктуацій кута нахилу еліпса;

ж) інформаційні параметри відбитих від іоносфери радіосигналів КХ-радіостанцій, рекомендовані для виявлення АІЗ: крутизна спадання та періоди коливань нормованих АКФ короткотривалих реалізацій сигналів тривалістю порядку 1 хв, час появи, період, кількість та інтенсивність мод коливань на допплерограмах, дисперсія флуктуацій еліпса поляризації сигналу та параметри її часових змін.

8. В експериментах із застосуванням методу слабонахиленого зондування при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *розсіяних* іоносферних сигналів встановлено:

a) кореляцію змін амплітуди сигналу з початком акустичного збудження;

б) прояв першої реакції із затримкою τ₃ ≈ 7 хв у вигляді незначного короткотривалого підвищення амплітуди (приблизно удвічі за 10...15 хв);

в) значне (у 5...6 разів) довготривале ($\tau \approx 1$ год) підвищення амплітуди сигналу з затримкою $\tau_3 \approx 25$ хв і її коливання з періодом 10...12 хв;

г) закономірності флуктуацій параметрів сигналу (амплітуди, періоду) у збуреному стані іоносфери, коли його амплітуда зростає, та незбуреному; це відповідає моделі акустико-іоносферної взаємодії у вигляді зміни просторового розподілу дрібномасштабних неоднорідностей, кількість яких у збуреному акустикою стані збільшується, що призводить до підвищення вкладу ревербераційних процесів в іоносфері та відповідного зростання амплітуди флуктуацій розсіяного сигналу;

д) зміни в допплерівських спектрах сигналу, які свідчать про наявність вертикальної динаміки створених AI3 із швидкостями переміщення
$v_{AI3} \approx v_s$; про це свідчать такі ефекти: розширення спектру приблизно на 1 Гц; поява допплерівського зсуву частоти до 7 Гц тривалістю менше 1 хв із затримкою τ₂ ≈ 7 хв; поява двомодовості сигналу; поява коливань допплерівського зсуву з амплітудою менше 1 Гц і періодами 10...11 хв і 22...24 хв на тих ділянках допплерограм, які збігаються з підвищенням амплітуди сигналу; періодичне (з періодом приблизно 35 хв) розширення областей допплерівського зсуву на 7 Гц в координатах «час — амплітуда», що можна описати такою моделлю — НЧ-ААХ поширюється в атмосфері, і на 7-й хвилині проходить через досліджувану розсіювальну область іоносфери, короткочасно стимулюючи організоване вертикальне переміщення дрібномасштабних неоднорідностей; у подальші відрізки часу внаслідок отримання коливного імпульсу певного типу ці неоднорідності перебудовуються, утворюючи більш крупні області та генеруючи різні типи плазмових хвиль; останні у процесі руху в іоносферному каналі з урахуванням впливу геомагнітного поля спричинюють коливний в часі ефект розсіювання, спрямований в напрямку приймальної антени;

е) інформаційними характеристиками розсіяних сигналів КХ-радіостанцій, рекомендованими для виявлення AI3, є параметри часових залежностей потужності сигналу (середній рівень на проміжку тривалістю 1 хв; рівень флуктуацій; періоди коливань середнього рівня; допплерівський зсув на 5...10 Гц, що відповідає швидкостям переміщення $v_{ДІH} \approx v_s$ дрібномасштабних іоносферних неоднорідностей), а також наявність коливань і параметри допплерограм розсіяного сигналу (час появи, період, кількість та інтенсивність мод, допплерівський зсув частоти).

9. Високі чутливість і завадостійкість, широка функціональність радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа УРАН-3, а також можливість реалізації різних методик зондування іоносфери дозволяють розв'язувати задачі дистанційного виявлення та діагностики енергетично слабких AI3, стимульованих впливом хвиль, генерованих HKAB.

Сформульовані висновки є результатом попереднього вивчення проблеми штучної АМІ на основі використання НКАВ і аналізу параметрів інфразвукових хвиль, генерованих випадковими природними та рукотворними джерелами. Ця робота реалізується в рамках Цільової програми НАН України з космічних досліджень на період 2018—2022 рр. і передбачає: удосконалення наявної наземної низькочастотної акустичної та радіоастрономічної інфраструктури з метою створення комплексу акусто-електромагнітного зондування іоносфери у сейсмічно небезпечному Прикарпатському регіоні; оптимізацію застосованих технологій отримання й обробки даних; проведення довготривалих серій активних експериментів з використанням удосконаленого НКАВ у різних режимах і частотних діапазонах генерації інфразвуку для отримання статистично стійких оцінок іоносферних сигналів і перевірки різних моделей акустико-іоносферної взаємодії; узагальнення результатів досліджень з проблеми штучної акустичної модифікації іоносфери.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ

Радіоастрономічна інфраструктура. Удосконалення комплексу стосувалося системи реєстрації та накопичення даних радіотелескопа УРАН-3 в частині розширення частотної смуги пропускання, підвищення чутливості й оптимізації форми подання й обробки даних. У даний час система дозволяє реєструвати космічне радіовипромінювання у вигляді динамічних частотних спектрів декаметрової складової в діапазоні 16.5...33 МГц з частотним розділенням $\Delta f = 12$ кГц і часовим розділенням $\Delta t = 1$ мс...1 хв.

Одним із основних компонентів удосконаленого комплексу є широкосмугова цифрова система реєстрації. На відміну від попередніх досліджень в даний час вона складається з двох таких модулів.

1. Модуль аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), який забезпечує високі параметри перетворення, швидку адаптацію аналогової вхідної частини до розширеного частотного діапазону вхідного сигналу шириною 1...60 МГц, а також суттєве зниження рівня внутрішніх шумів.

2. Модуль цифрової обробки сигналів ADP64Z2PCI з регульованими параметрами: два

канали АЦП, 16 біт із частотою оцифрування до 130 МГц, смуга аналізу до 66 МГц (відношення сигнал / завада перевищує 72 дБ, динамічний діапазон, вільний від паразитних складових, - понад 100 дБ, шумовий поріг дорівнює 115 дБ); вибір частотного діапазону здійснюється від власного стабільного кварцового генератора (f = 66 MFu) або від зовнішнього генератора (f = 10...130 МГц); число вихідних спектральних каналів дорівнює 8192; часове вікно Ханна обирається за замовчуванням; перекриття сигналу в часовій області складає 8192 відліків; внутрішнє ядро комплексного швидкого перетворення Фур'є містить 16384 точок, розрядність обчислень — 28; кількість накопичень спектрів потужності — 1...1024; розрядність накопичувача спектрів — 60 біт; вихідна розрядність спектральних даних — 32 біт; формат вихідних даних для спектрів — 32-бітове беззнакове ціле або 25-бітова мантиса, 5-бітова експонента; максимальний неперервний вихідний потік даних дорівнює 240 Мбайт/с (частота оцифрування 66 МГц); передавання даних у персональний комп'ютер здійснюється по інтерфейсу РСІ-Х (підтримка специфікацій 32/33, 32/66, 64/66); запис «сирих» даних відбувається з виходу АЦП (швидкість передачі з можливістю запису на жорсткий диск (*RAID 0*) — до 240 MБ/с); швидкість запису даних у пакетному режимі передачі — до 260 МБ/с; відображення спектрограм організовано у реальному часі.

Акустичну інфраструктуру комплексу в експериментах, проведених впродовж 2018 р., представляв варіант стаціонарного ВЧ НКАВ [11, 12, 14, 15] після часткової модернізації та відновлення працездатності його механічних блоків (заміна роторів, приведення в робочий стан ремінної передачі та системи подачі мастила). Він забезпечував генерацію хвиль з частотою $f_s \approx 30$ Гц.

Експериментальна апробація комплексу. Для апробації комплексу акустико-електромагнітного зондування іоносфери з 25 до 29 вересня 2018 р. проведено серію з 15 експериментів за схемою рис. 5, а. При цьому враховували поточні погодні умови, оскільки останні можуть суттєво впливати на поширення ААХ на частотах, близьких до $f_s \approx 30$ Гц, (значення, яке незначно перевищує верхню межу інфразвукового діапазону).

Мета експериментів — оцінити можливість керованого створення та виявлення слабких АІЗ.

Дослідження штучних АІЗ проведено радіоастрономічним методом з використанням зондувального космічного радіовипромінювання ряду дискретних джерел та галактичного тла у смузі 20...25 МГц. Часові реалізації сигналів від радіохвиль, що пройшли крізь іоносферу, аналізували перед, під час та після роботи НКАВ, а також без акустичного збудження при фіксованих положеннях діаграми спрямованості радіотелескопа УРАН-3. Геометрію вибрано так, щоб радіовипромінювання могло взаємодіяти з акустичною хвилею на висотах іоносфери H = 50...200 км, а його інтенсивність відповідала чутливості радіотелескопа. Цим вимогам задовольняли в цей час радіоджерела 3С274 і 3С348 з параметрами відповідно: кути кульмінації 51° і 44°, густина потоку 5300 і 2300 Ян.

На рис. 8 наведено експериментальні записи (тривалістю 1 год) динамічних частотних спектрів космічного радіовипромінювання джерела 3C348 у смузі 20...25 МГц (рис. 8, *a*, вгорі) і часового профілю зареєстрованого радіосигналу на частотіf = 22 МГц (рис. 8, a, внизу). Експеримент проведено 28.09.2018 р. з 14:40:00 UT до 15:30:00 UT. На рис. 8, *a*, вгорі, початок роботи НКАВ позначено стрілкою, що відповідає моменту часу 14:42:00 UT (17:42:00 LT) і враховує час кульмінації джерела 14:49 UT. НКАВ генерує в режимі триразового повтору акустичного імпульсу типу «звучання 60 с — пауза 60 с». На рис. 8, б показано аналогічні записи спостережень, проведені 29.09.2018 р. без акустичного випромінювання, коли НКАВ не вмикали. Місцевий час проведення цих спостережень збігається з часом експерименту від 28.09.2018 р., коли НКАВ випромінював. Порівняння часових характеристик режиму НКАВ із часовими профілями та динамічними часовими спектрами пройденого через іоносферу радіовипромінювання (рис. 8) дозволяє стверджувати про появу на записах на 5-6-й хв після початку акустичного збудження ділянки тривалістю 7—10 хв змінної інтенсивності, яка виділена еліпсом.

Із записів часових профілів і динамічних спектрів на частоті f = 22 МГц, представлених на



Рис. 8. Динамічні частотні спектри космічного радіовипромінювання (зображення вгорі) і часові профілі (графіки внизу), зареєстровані 28.09.2018 р. на частоті 22 МГц з акустичним збудженням (*a*) і 29.09.2018 р. без нього (*б*). Тривалість запису — 1 год. Стрілкою позначено час початку роботи випромінювача. Еліпсом окреслено часову ділянку прояву реакції іоносфери, спричиненої поширенням через неї акустичної хвилі

рис. 8, *а*, виокремлено і зображено у збільшеному масштабі на рис. 9 виділену еліпсом ділянку. Відносно чіткий прояв коливань на записах від 28 вересня 2018 р. може свідчити про реєстрацію сигналу після проходження радіовипромінювання крізь акустично модифіковану іоносферу. Його ймовірне часове положення оцінено на основі розрахованого середнього значення швидкості v_s поширення акустичної хвилі. На записах від 29 вересня 2018 р. без акустичного збудження на фоні галактичного тла реєстрували шум, який був сильнішим, аніж напередодні з акустичним збудженням. Проте періодичних викидів не зафіксовано, зокрема і у момент кульмінації радіоджерела 3С348 (14:45 UT). Таким чином, за наведеними вище результатами експрес-аналізу виявлено зміни, зумовлені, ймовірно, процесом AMI на висотах понад 100 км. Виявлені іоносферні турбуленції можна ідентифікувати як штучні AI3, спричинені дією НКАВ, на основі розрахунку часової затримки проходження акустичної хвилі до іоносфери. Цей результат підтверджує можливість застосування моделі резонансного просвітлення іоносфери за рахунок формування рухомої періодичної області концентрації електронів іоносферної плазми з періодом, що дорівнює тривалості AAX [74]. Згідно з цією моделлю для пройденого крізь іоносферу космічного радіовипромінювання у певних умовах може мати місце резонансне збільшення



Рис. 9. Виділені для аналізу ділянки тривалістю 20 хв на записах часових профілів (a, верхній) та динамічних частотних спектрів (δ , верхній) космічного радіовипромінювання на f = 22 МГц, зареєстрованих при дії акустичного збудження і без нього (a, δ , нижні)

ії прозорості, причому коефіцієнт проходження хвилі може багатократно збільшуватися.

Апробація інформаційних технологій опрацювання даних експериментів. Наведений на рис. 8 і 9 приклад однократного генерування випромінювачем ААХ на частоті $f_s \approx 30$ Гц і виявлення стимульованих її дією штучних АІЗ демонструє: а) енергетичну слабкість іоносферних сигналів від штучних АІЗ, сформованих в іоносфері, б) невисоку ефективність використаних інформаційних технологій. Тому були застосовані інші варіанти опрацювання сигналів і оцінено ефект від їхнього застосування.

1. <u>Повторюваність штучної акустичної модифікації</u>. Рис. 10 демонструє результати порівняння реалізацій трансмісійних сигналів від космічного радіовипромінювання під час наземного випромінювання ААХ з допомогою НКАВ (рис. 10, *a*, *г* – 27.09.2018 р., рис. 10, *б*, $\partial - 28.09.2018$ р.) і без випромінювання ААХ (рис. 10, в, е — 29.09.2018 р.). Початок роботи НКАВ відповідає позначці t = 0 с на різних часових ділянках. Рис. 10, а-в демонструє ділянку 0...1200 с, а рис. 10, *г*-*е* – ділянку 500...800 с. Результат порівняння — формування в іоносфері штучних AI3 при роботі НКАВ супроводжується появою ділянки тривалістю 400...800 с, яка містить періодичні коливання з більш-менш стійким періодом, причому реалізації іоносферних сигналів більш зашумлені, а діапазон зміни періоду коливань амплітуди значно ширший при відсутності генерації ААХ.



Puc. 10. Порівняння часових реалізацій трансмісійних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0... 1000 с (a, δ, e) та їхні ділянки в діапазоні тривалості 500...800 с (z, ∂, e) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. (a, z) і 28.09.2018 р. (δ, ∂) (початок роботи випромінювача відповідає позначці t = 0 с) та без нього 29.09.2018 р. (e, e)



Рис. 11. Ділянка тривалістю 500...800 с часових реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання (a, δ , e — вгорі) та амплітудні спектри (a, δ , e — внизу) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. (a) і 28.09.2018 р. (δ). Початок роботи випромінювача відповідає позначці t = 0 с. Запис без акустичного збудження — 29.09.2018 р. (e)



Рис. 12. Часові реалізації трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с, зареєстровані після їхньої фільтрації на частотах f = 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно a, δ , e) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27 і 28 вересня 2018 р. (лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці t = 0 с) і без нього 29.09.2018 р. (правий стовпчик)

2. <u>Інформативність</u> амплітудних спектрів.</u> На рис. 11 наведені записи часових реалізацій сигналу в діапазоні 500...800 с та їхні амплітудні спектри під час роботи НКАВ (рис. 11, *a*, *б*) і без генерації ААХ (рис. 11, *в*), зареєстровані відповідно 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. під впливом ААХ, і 29.09.2018 р. — без нього. Записи демонструють, що на частотах акустичної стимуляції $f_s \approx 30$ Гц відсутня стійка повторюваність амплітудних спектрів у різних умовах наземного акустичного збудження. Записи не містять чітких інформаційних ознак, які б дозволяли ідентифікувати штучні АІЗ, стимульовані роботою НКАВ.

3. <u>Частотна фільтрація</u>. На рис. 12 наведені записи часових реалізацій сигналу в діапазоні 0...1000 с, зареєстровані 27.09.18 р. і 28.09.2018 р. під час наземної генерації ААХ (лівий і середній стовпці) і 29.09.2018 р. без неї (правий стовпець). Початок роботи НКАВ відповідає позначці *t* = = 0 с. Після фільтрації на частотах 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц реалізації сигналу зображені відпо-

відно на рис. 12, *а*—*в*. З результатів їхнього аналізу випливає, що прояви штучної АМІ на різних частотах відрізняються. Це свідчить про вплив частоти зондувального сигналу на інформативність цього процесу при реалізації спостережень радіоастрономічним методом та про необхідність оптимізації частотних параметрів приймального тракту для такого класу експериментів.

4. <u>Вейвлет-перетворення відфільтрованих реалізацій</u>. Результати застосування інформаційних технологій спектральної обробки часових реалізацій сигналів тривалістю 0...1000 с демонструє рис. 13. Технологія експерименту включає послідовні операції: а) реєстрація сигналів 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. під час генерації ААХ (відповідно — рис. 13, *a*, *c*, лівий і середній) і 29.09.2018 р. без неї (рис. 13, *a*, *c*, правий); б) фільтрація на частоті f = 22 МГц у смузі 4 кГц; в) вейвлет-перетворення на основі двох базисних функцій — Добеші (рис. 13, *б*) і Морле (рис. 13, *в*). Якісне порівняння отриманих результатів



Рис. 13. Приклад застосування інформаційних технологій для обробки часових реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с: *реєстрація* під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (відповідно *a*, *c* — лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці t = 0 с) і без нього 29.09.2018 р. (*a*, *c* — правий стовпчик), *фільтрація* на частоті f = 22 МГц (*a*, *c*) в смугах 4 кГц (*a*) і 400 кГц (*c*), *вейвлет-перетворення* Добеші (*б*, *d*) та Морле (*в*)

застосування перетворень Добеші та Морле для виявлення слабких AI3 не дозволило зробити в даному випадку висновок про перевагу якогось з них.

Ефект від застосування вейвлет-перетворення Добеші для виявлення слабких штучних AI3 демонструє рис. 13, *г*, *д*. Часові реалізації сигналів після фільтрації на частоті f = 22 МГц у смузі частот 400 кГц наведені на рис. 13, г. Вони демонструють, що при наявності ААХ, генерованої з допомогою НКАВ, прояв її впливу на іоносферу є чіткішим і відношення сигнал / завада вищим. За відсутності ААХ зареєстрований сигнал значно більше зашумлений. На спектрограмах До-



Рис. 14. Часові реалізації тривалістю 0...1000 с та вейвлет-перетворення Добеші трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання: після *реєстрації* під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (відповідно *a*, *в*, ∂ — лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці t = 0 с) і без нього 29.09.2018 р. (*a*, *в*, ∂ — правий стовпчик), після *фільтрації* на частотах f = 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц (*a*, *в*, ∂) і *вейвлет-перетворення* Добеші (*б*, *г*, ∂)

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2



беші (рис. 13, *d*) цей висновок підтверджує ефект локалізації інтенсивності спектру сигналу на тих часових ділянках, які відповідають ймовірним проявам AI3 за розрахунками часу поширення AAX на часових реалізаціях сигналу. При відсутності AAX спектральні складові розподілені хаотично вздовж горизонтальної осі (час поширення) спектрограми Добеші.

5. Системний спектральний аналіз. Апробовано один із варіантів методики розширеного спектрального аналізу з метою виявлення слабких AI3, спричинених дією НКАВ на частотах $f_s \approx 30$ Гц. Цей варіант передбачає послідовне застосування операцій частотної фільтрації і вейвлет-перетворення. На рис. 14, а, в, д зліва і посередині наведено часові реалізації сигналу тривалістю 0...1000 с, зареєстровані при генерації ААХ відповідно 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (момент початку генерації відповідає позначці t = 0 с), а на рис. 14, *a*, *b*, *d* справа — 29.09.2018 р. без генерації ААХ. Представлені на рис. 14, *a*, рис. 14, *в* і рис. 14, ∂ реалізації сигналу профільтровані на частотах f = 22, 23і 24 МГц у смузі 4 кГц. За результатами спектрального аналізу з використанням базисної функції Добеші отримано спектрограми (рис. 14, б, г, е), які підтвердили, що основний вклад у позитивний ефект від застосування цього аналізу вносить операція вейвлет-перетворення, а не фільтрації.

6. Розширений системний спектральний аналіз. Представлений вище варіант технології обробки часових реалізацій сигналів доповнено побудовою скейлограми на основі обчислення сумарних значень періодів НЧ-коливань за час реєстрації реалізацій. На рис. 15 для порівняння наведені часові реалізації (верхні рядки), вейвлет-спектрограми Морле (середні рядки), амплітудні спектри (віконне швидке перетворення Фур'є) та скейлограми (нижні рядки) сигналів, зареєстрованих 27.09.2018 р. і 28.08.2019 р. під час генерації ААХ (рис. 15, а, рис. 15, б) і 29.09.2018 р. без неї (рис. 15, в) на f = 22, 23, 24 МГц у смузі 4 кГц. На рис. 16 ці залежності для трьох частот представлені у виокремленому вигляді та збільшеному масштабі. На ньому ліві і середні стовпчики відповідають датам 27.09.2018 р. і 28.08.2019 р., коли була генерація ААХ, а праві — даті 29.09.2018 р., коли вона була відсутня. Амплітудні спектри і скейлограми представлені на рис. 16, а, б, в відповідно штриховими і суцільними лініями.

Використання скейлограми дозволило виявити переважаючі періоди НЧ-коливань часових



Рис. 15. Параметри трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання, отримані на частотах f = 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно a, δ, e) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27 і 28 вересня 2018 р. (лівий і середній стовпчики на фрагментах a, δ, e) та без нього — 29 вересня 2018 р. (правий стовпчик). Верхні рядки на фрагментах a, δ, e — часові реалізації, середні рядки — вейвлет-спектрограми Морле, нижні рядки — амплітудні FFT-спектри часових реалізацій (пунктирні криві) і скейлограми (суцільні криві)



Рис. 16. Амплітудні спектри (віконне FFT — штрихові криві, скейлограми — суцільні криві) трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с, зареєстровані на частотах f = 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно a, δ, s) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (лівий і середній стовпчики) і без нього 29.09.2018 р. (правий стовпчик). Штрихові вертикальні лінії — переважні періоди коливань (~95 с і 190 с)

реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів на ділянках 0...1000 с. У даному прикладі їх стабільно реєстрували 27.09.2018 р. і 28.03.2019 р. за наявності генерації ААХ, причому вказані періоди склали приблизно 95 с і 190 с (на рис. 16, *а* їхнє положення позначено вертикальними штриховими лініями). При відсутності генерації ААХ (29.03.2019 р.) ці переважаючі значення періодів не зареєстровані. Отриманий результат підтверджує доцільність застосування інформаційної технології побудови скейлограми для виявлення слабких AI3, утворення яких в іоносфері стимульовано дією НКАВ на частотах $f_s \approx 30$ Гц.

ВИСНОВКИ

В даній роботі на основі узагальнення результатів досліджень проблеми акустичної модифікації середовища навколоземного простору, включаючи іоносферу, сформульовано вимоги до удосконалення комплексу акустико-електромагнітного зондування іоносфери з використанням наземного керованого акустичного випромінювача та декаметрового радіотелескопа УРАН-3.

Показано, що для стимуляції ефекту штучної акустичної модифікації іоносфери на основі використання наземного керованого акустичного випромінювача необхідно забезпечити певні частотні і енергетичні параметри генерованих ним атмосферних акустичних хвиль. Зроблене з цією метою відповідне вдосконалення акустичного випромінювача дозволило провести у 2018 р. перший етап його експериментальної апробації, за результатами якого оцінено можливість реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери на частотах $f_s \approx 30$ Гц, що відповідає верхній границі інфразвукового діапазону.

Аналіз перших результатів апробації удосконаленого комплексу та результати застосування сучасних інформаційних технологій розширеного системного спектрального аналізу сигналів радіовипромінювання космічних радіоджерел підтвердили, що у випадку наземної генерації інфразвуку з частотою біля верхньої границі інфразвукового діапазону є можливість досягнення ефекту штучної модифікації іоносфери та виявлення слабких акустоіоносферних збурень. Цей ефект спостерігається при певних станах приземної і верхньої атмосфери, які визначаються погодними умовами та рівнем завад і впливають на поширення атмосферних акустичних хвиль. Наступний етап роботи передбачає дослідження виявлених ефектів з використанням наземного керованого акустичного випромінювача в діапазоні 2...10 Гц, який точніше відповідає умовам сейсмо-іоносферної взаємодії.

Робота частково підтримана Цільовою комплексною програмою НАН України з наукових космічних досліджень на період 2018—2022 рр. та бюджетними НДР, які виконуються ФМІ НАН України та кафедрою космічної радіофізики ХНУ ім. В. Н. Каразіна.

ЛІТЕРАТУРА

- Альперович Л. С., Афраймович Э. Л., Вугмейстер Б. О., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Ерущенков А. И., Иванов Е. А., Калихман А. Д., Кудрявцев В. П., Куличков С. Н., Краснов В. М., Мордухович М. И., Матвеев А. К., Нагорский П. М., Пономарев Е. А., Салихов Н. М., Таращук Ю. Е., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Акустическая волна взрыва. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* 1985. № 11. С. 32–42.
- Госреестр открытий СССР. Явление воздействия сейсмичности Земли через акустические волны на ионосферу / Бирфельд Я. Г., Таранцов А. В. № 128, 02.09.1963, приоритет от 25.09.1963.
- 3. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. Москва: Мир, 1975. 532 с.
- 4. Дробжева Я. В. *Распространение акустических волн в верхней атмосфере*: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Алматы, 2003. 143 с.
- 5. Дробжева Я. В., Краснов В. М. Итоги проекта «МАССА» через 15 лет. Взрывное дело. 1997. № 3. С. 34—39.
- Емельянов Л. Я., Живолуп Т. Г., Сорока С. А., Черемных О. К., Черногор Л. Ф. Наземное акустическое воздействие на атмосферу: результаты наблюдений методами некогерентного рассеяния и вертикального зондирования. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. 20, № 1. С. 37—47.
- Івантишин О. Л. Інформаційно-вимірювальний комплекс на базі радіотелескопа УРАН-3 для дослідження слабких акусто-іоносферних збурень: автореф. дис. канд. техн. наук. Львів: Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, 2007. 20 с.
- Калита Б. И., Каратаева Л. М., Мезенцев В. П., Ногач Р. Т. Активные акустические эксперименты со спутником DEMETER. *Космический проект «Ионосат-Микро»*: монография (Ред. С. А. Засуха, О. П. Федоров). Киев: Академпериодика, 2013. С. 193–199.
- 9. Каліта Б. І., Каратаєва Л. М., Мезенцев В. П., Ногач Р. Т., Сорока С. О. Вплив акустичних збурень на прозорість іоносфери. *Відбір і обробка інформації*. 2011. № 35 (111). С. 77—83.
- 10. Каллистратова М. А., Кон А. И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва: Наука, 1985. 195 с.
- 11. Кошевой В. В. Радиофизическая и радиоастрономическая диагностика ионосферных эффектов, вызванных наземным инфразвуковым излучателем (предварительные результаты). *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999. **42**, № 8. С. 785—798.

- Кошевой В. В., Ивантишин О. Л. Выявление слабых акусто-ионосферных возмущений методом рассеивания радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях с использованием декаметрового радиотелескопа УРАН-3. Отбор и обработка информации. 1998. 12 (88). С. 32—36.
- 13. Кошовий В. В., Івантишин О. Л. Дослідження штучних акусто-іоносферних збурень радіоастрономічним методом. *Відбір і обробка інформації*. 1999. **13** (89). С. 21–25.
- 14. Кошовий В. В., Сорока С. О. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем. І. Експериментальне виявлення акусто-іоносферних збурень. *Космічна наука і технологія*. 1998. **4**, № 5-6. С. 3—17.
- 15. Матвийчук Я. Н., Сорока С. А. Возможный механизм электромагнитных откликов на акустические возмущения в атмосфере. Космічна наука і технологія. 2002. 9, додаток до № 2. С. 194—201.
- 16. Назарчук З. Т., Кошевой В. В., Сорока С. А., Ивантишин О. Л., Лозинский А. Б., Романишин И. М. К вопросу акустико-электромагнитного зондирования ионосферы. *Космічна наука і технологія*. 2002. **9**, додаток до № 2. С. 120–131.
- 17. Негода А. А., Сорока С. А. Перспективы развития исследований атмосферы и ионосферы с использованием искусственного акустического воздействия. *Космічна наука і технологія*. 1999. **5**, № 2-3. С. 3–12.
- 18. Пат. України на корисну модель № 59531 МПК G01W 1/08 (2006. 01). Івантишин О. Л., Кошовий В. В., Лозинський А. Б., Назарчук З. Т., Романишин І. М., Сорока С. О. Спосіб оцінювання інфразвукової обстановки на поверхні землі на основі акусто-електромагнітного моніторингу іоносфери.
- 19. Селіванов Ю. О., Рапопорт Ю. Г., Черемних О. К. Іоносферний відгук на акустичну дію за даними мікросупутників DEMETER та «Чибис-М». *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 6. С. 41—56.
- 20. Хргиан А. Х., Кузнецов Г. И. Атмосферный озон, его вариации и геофизические связи. Взаимодействие в системе литосфера гидросфера атмосфера. Москва: Недра, 1996. С. 241—267.
- 21. Черемных О. К., Климов С. И., Корепанов В. Е., Кошовый В. В., Мельник М. Е., Ивантишин О. Л., Мезенцев В. П., Ногач Р. Т., Рапопорт Ю. Г., Селиванов Ю. А., Семенов Л. П. Наземно-космический эксперимент по искусственной акустической модификации ионосферы. Первые результаты. *Космічна наука і технологія*. 2014. **20**, № 6. С. 60—73.
- 22. Черногор Л. Ф. Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997. **2**, № 4. С. 463—472.
- 23. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження». *Космічна наука і технологія*. 1999. **5**, № 1. С. 38–47.
- 24. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март апрель 2003 г.). Космічна наука і технологія. 2003. 9, № 2/3. С. 13—33.
- 25. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофиз. журн.* 2004. **26**, № 4. С. 31—44.
- 26. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофиз. журн.* 2004. **26**, № 6. С. 61–73.
- 27. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэко*логия. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2006. № 6. С. 522—535.
- 28. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля атмосфера ионосфера магнитосфера. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 2/3. С. 16—26.
- 29. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2008. № 4. С. 359—369.
- 30. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
- 31. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
- 32. Черногор Л. Ф. Катастрофа на наибольшем арсенале боеприпасов. Наука и техника. 2017. № 5 (132). С. 4–10.
- 33. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. **22**, № 1. С. 53-66.
- 34. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики параметров метеороидов в атмосфере Земли. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. **34**, № 3. С. 42—58.
- 35. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кинематика и физика небесных тел.* 2019. **35**, № 4. С. 35–56. Ч. 2. № 5. С. 25–47. Ч. 3. № 6. С. 34–61.
- 36. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. **59**, № 3. С. 400 — 408.
- 37. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 4. С. 280—293.

- 38. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Глобальная статистика болидов в атмосфере Земли. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2017. **22**, № 2. С. 138—145.
- Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом мощного вулкана, от расстояния. Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. 2017. 27. С. 57—60.
- 40. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 1. С. 24—35.
- 41. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной тунгусским космическим телом, от расстояния. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 2. С. 94—103.
- 42. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. Кинематика и физика небес. тел. 2018. **34**, № 3. С. 59—75.
- 43. Чорногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів. Обчисл. методи і системи перетв. інформації: зб. пр. V НТК, Львів, 4 5 жовтня 2018 р. Львів: ФМІ НАНУ, 2018. Вип. 5. С. 99—103.
- 44. Arrowsmith S. J., ReVelle D. O., Edwards W. N., Brown P. G. Global detection of infrasonic signals from three large bolides. *Earth, Moon, and Planets.* 2008. **102**, № 1-4. P. 35–363.
- 45. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. J. Geophys. Res. 1979. 84C, № 4. P. 1735–1745.
- 46. Balachandran N. K., Donn W. L. Characteristics of infrasonic signals from rockets. *Geophys. J. International.* 1971. 26, № 1–4. P. 135–148.
- 47. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*. 1977. **197**, № 4298. P. 47–49.
- Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. *Ann. Geophys.* 1985. 3. P. 673–688.
- 49. Blaunstein N. (2001). Method of earthquake prediction, The United States Patent No. US 6,246,964 B1.
- 50. Brown P., Pack D., Edwards W. N., Revelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*. 2004. **39**, № 11. P. 1781–1796.
- 51. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2015. **33**, № 6. P. 276–290.
- 52. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Infrasonic signals generated by a series of chemical explosions near Vinnytsia city*. Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. (Kyiv, Ukraine, May 29–June 01, 2018): Book of Abstracts. 2018. P. 87–88.
- Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot. Proceedings of the XIXth International young scientists' conference on applied physics (May 21–25, 2019). Kyiv, 2019. P. 100–101.
- 54. Chernogor L. F., Shevelev N. B. Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2018. **34**, № 3. P. 147–160.
- Chernogor L. F., Qiang Guo, Rozumenko V. T., Shevelev M. B. *The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid*. Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. (Kyiv, Ukraine, May 29–June 01, 2018): Book of Abstracts. 2018. P. 89–90.
- 56. Che Y., Park J., Kim I. Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. International*. 2014. **198**, № 1. P. 495–503.
- 57. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*. 1993. **361**, № 6407. P. 40–44.
- 58. Cook R. K., Young J. M. Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. Sound: Its Uses and Control. 1962. 1, № 3. P. 25-33.
- 59. Donn W. L. Exploring the atmosphere with sonic booms: or how i learned to love the concorde. *American Scientist*. 1978. **66**, № 6. P. 724–733.
- 60. Donn W. L., Balachandran N. K. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Airwaves and explosive yield. *Science*. 1981.
 213, № 4507. P. 539-541.
- 61. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., Balachandran N. K. Infrasound at long range from Saturn V, 1967. *Science*. 1967. **162**, № 3858. P. 1116–1120.
- 62. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. 68. P. 1136–1160.
- 63. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., Hamama I. H. Infrasound detection of meteors. *NRIAG J. Astron. and Geophys.* 2017. 6, № 1. P. 68–80.

- 64. Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N. Infrasound production by bolides: A global statistical study. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. 80. P. 208–229.
- 65. Galperin Yu., Hayakawa M. On magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3. *Geoelectric*. 1996. **48**. P. 1241–1263.
- 66. Galperin Yu., Hayakawa M. On possibility of parametric amplifier in the stratosphere-mesosphere suggested by active MAS-SA experiments with the AUREOL-3 satellite. *Earth Planets Space*. 1998. **50**. P. 827–832.
- 67. Gi N. Using bolide airwaves to estimate meteoroid source characteristics and window damage potential. *Electronic Thesis* and Dissertation Repository. 2017. **4688.** 165 p. URL: https://ir. lib. uwo. ca/etd/4688 (дата звернення 17.07.2019).
- 68. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. Lithosphere-ionosphere coupling and its modeling. Russian J. Earth Sci. 2000. 2. P. 95-108.
- 69. Gotynyan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G., Parrot M. Ionospheric disturbances excited by the lithospheric gas source of acoustic gravity waves before earthquakes. *Space Sci. and Technol.* 2003. **9**, No. 2. P. 89 105.
- 70. Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Perez-Enriquez R., Kotsarenko A. Increase of the transparency for cosmic radio waves due to the decrease of density of the ionosphere caused by acoustic waves. *Physica Scripta*. 2006. **72**(1). P. 91.
- 71. Koshevaya, S., Kotsarenko, Yu., Escobedo, J. A., Kotsarenko and Yutsis, V. A. Cosmic radio waves caused by seismic volcano activities. *J. Electromagnetic Analysis and Applications*. 2014. 6. P. 335–341. URL: http://www.scirp.org/journal/ jemaa, http://dx. doi. org/10. 4236/jemaa. 2014. 611034 (дата звернення 17.07.2019).
- 72. Koshevaya, S., Makarets, N., Grimalsky, V., Kotsarenko, A., Perez Enríquez R. Spectrum of the seismic-electromagnetic and acoustic waves caused by seismic and volcano activity. *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2005, 5 (2), P. 203-209. HAL Id: hal-00299144. URL: https://hal. archives-ouvertes. fr/hal-00299144 (дата звернення 17.07.2019).
- 73. Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L., Lozynskyy A. B., et al. Radiophysical complexes for cosmic investigations based on Ukrainian radiotelescope URAN-3. *Asta Cosmologica*. FASCICULUS XXIII-2. 1997. P. 67–70.
- 74. Kotsarenko N. Ya., Soroka S. A., Koshevaya S. V., Koshovyy V. V. Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave. *Physica Scripta*. 1999. **59**, № 2. P. 174–181.
- 75. Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes. *Acoust. Phys.* 2014. **60**, № 1. P. 19–28. DOI: 10. 1134/S1063771013060109.
- 76. Landès M., Ceranna L., Le Pichon A. Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. J. Geophys. Res. 2012. 117D, № 6. Doi: 10. 1029/2011JD01668406102.
- 77. Le Pichon A., Blanc E. Hauchecorne A. (Eds.). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. New York: Springer Science + Business Media. 2010. 735 p.
- 78. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. **48**. № 6. P. 795–806.
- 79. Liszka L. Infrasound: a summary of 35 years of infrasound research. Swedish Institute of Space Physics. 150 p.
- 80. *Meteor Infrasound. What is Infrasound?* The Department of Physics and Astronomy, the University of Western Ontario, Meteor Physics. URL: http://meteor.uwo.ca/research/infrasound/is_whatisIS.html (дата звернення 17.07.2019).
- 81. Olson J. Infrasound rocket signatures. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2012. 1. P. 82.
- 82. Parrot, M., Hayosh, M., Soroka, S. O. Acoustic experiments in the ionosphere with the DEMETER satellite. *EGU General Assembly* (15–20 April 2007). Vienna, 2007. 1607-7962/gra/EGU2007-A-04428.
- 83. Pichon A., Garcés M., Blanc E., et al. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. J. Acoust. Soc. Amer. 2002. 111, № 1. P. 629–641.
- 84. Ponomarev E. A., Erushchenkov A. I. Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1978. **20**, № 12. P. 1218–1229.
- 85. Proksch N. Lightning detection with infrasound. Master's Thesis. Utrecht University. Royal Netherlands Meteorological Institute, 2017. 53 p.
- 86. Rapoport V. O., Bespalov P. A., Mityakov N. A., Parrot M., Ryzhov N. A. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004. 66, № 12. P. 1011–1017. DOI 0.1016/j.jastp.2004.03.010.
- Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Mezentsev V. P., Karataeva L. M., Ivchenko V. M., Milinevsky G. P., Fedun V. N., Tkachenko E. N. Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. *Ann. Geophys.* 2017. 35. P. 53–70. DOI:10.5194/angeo-35-53-2017.
- 88. Reed J. W. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. J. Geophys. Res. 1987. 92, № D10. P. 11979–11992. DOI: 10. 1029/JD092iD10p11979.

- Sakurai A. *Blast wave theory*. Basic developments in fluid dynamics. Holt M. (ed). New York: Academic Press, 1965. Vol. 1. P. 309–375.
- 90. Savina O. N., Bespalov P. A. Ionospheric response to the acoustic gravity wave singularity. *Acta Geophysica*. 2015. **63**, № 1. P. 319—328. DOI: 10. 2478/s11600-014-0246-1. URL: http://creativecommons. org/licenses/by-nc-nd/3. 0/ (дата звернення 17.07.2019).
- 91. Silber E. A. *Observational and theoretical investigation of cylindrical line source blast theory using meteors*. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2014. Paper 2112. 582 p.
- 92. Silber E. A., Brown P. G. Optical observations of meteors generating infrasound. I. Acoustic signal identification and phenomenology. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. 119. P. 116–128.
- 93. Silber E. A., Brown P. G., Krzeminski Z. Optical observations of meteors generating infrasound: weak shock theory and validation. J. Geophys. Res: Planets. 2015. 120, № 3. P. 413–428.
- 94. Soroka S. O., Kalita B. I., Karataeva L. M., et al. Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. *International Conference DEMETER*, Toulouse, 14–16 June 2006.
- 95. Whipple F. J. W. The great Siberian meteor, and the waves, seismic and aerial, which it produces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1930. **56**, № 236. P. 287–301.

Стаття надійшла до редакції 17.07.2019

REFERENCES

- 1. Al'perovych L. S., Aphraimovych E. L., Vugmeister B. E., et al. (1985). Acoustic wave of explosion. *Earth Physics*, **11**, 32–42 [in Russian].
- 2. Birfel'd Ja. H., Tarancov A. V. (1963). The effect of Earth's seismicity through acoustic waves on the ionosphere. *State Register of Discoveries of the USSR*, № 128 [in Russian].
- 3. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975). Waves in the Atmosphere. Moscow: Publishing Mir.
- 4. Drobzheva Ya. V. (2003). Propagation of acoustic waves in the upper atmosphere. Doctor's Thesis, Almaty, 143 p. [in Russian].
- 5. Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M. (1997). Results of the project «MASSA» after 15 years. *Explosive Case*, 3, 34–39 [in Russian].
- Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G., Soroka S. A., Cheremnykh O. K., Chernogor L. F. (2015). Ground-based acoustic effects on the atmosphere: the results of observations by means of incoherent scattering and vertical sounding techniques. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 20 (1), 37–47 [in Russian].
- Ivantyshyn O. L. (2007). Information measuring complex based on the radio telescope URAN-3 for the study of weak acousto — ionospheric disturbances. Extended abstract of candidate's thesis. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
- Kalita B. I., Karatayeva L. M., Mezentsev V. P., Nogach R. T., Parrot M. (2013). Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. Space project "Ionosat—Micro": Monograph. (Eds S. A. Zasukha, O. P. Fedorov). Kyiv: Academperiodika, 193–199 [in Russian].
- 9. Kalita B. I., Karatayeva L. M., Mezentsev V. P., Nogach R. T., Soroka S. O. (2011). The effect of acoustic disturbances on a transparency of the ionosphere. *Information Selection and Processing*, **35** (111), 77–83 [in Ukrainian].
- 10. Kallystratova M. A., Kon A. Y. (1985). Radioacoustic sounding of the atmosphere. Moscow: Nauka [in Russian].
- 11. Koshovyy V. V. (1999). Radiophysical and radioastronomical diagnostics of ionospheric effects caused by the ground based infrasound emitter (preliminary results). *Universities News. Radiophysics*, **42** (8), 785–798 [in Russian].
- Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L. (1998). Detection of weak acousto-ionospheric disturbances by the method of radiowaves scattering on small — scale inhomogeneities using the decameter radio telescope URAN-3. *Information Selection and Processing*, **12** (88), 32–36 [in Ukrainian].
- Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L. (1999). Research of the acoustic artificial ionospheric disturbances by the radio astronomical method. *Information Selection and Processing*, 13 (89), 21–25 [in Ukrainian].
- 14. Koshovyy V. V., Soroka S. O. (1998). Acoustic disturbance of ionospheric plasma by a ground-based radiator. I. Experimental detection of the acoustic and ionospheric disturbances. *Space Science and Technology*, **4** (5/6), 3–17 [in Ukrainian].
- Matvijchuk Ja. N., Soroka S. A. (2002). Possible mechanism of electromagnetic responses to acoustic disturbances in the atmosphere. *Space Science and Technology*, 8 (2), 194–200.
- Nazarchuk Z. T., Koshevoy V. V., Soroka S. A., Ivantishin O. L., Lozynskyy A. B., Romanishin I. M. (2003). To the question of acousto – electromagnetic sounding of the ionosphere. *Space Science and Technology*, 9, Suppl. 2, 17–23 [in Russian].
- 17. Negoda A. A., Soroka S. A. (1999). Prospects for the development of atmospheric and ionospheric studies using artificial acoustic effects. *Space Science and Technology*, **5** (2/3), 3–12 [in Russian].
- Patent of Ukraine № 59531 M∏K G01W 1/08 (2006. 01). Ivantyshyn O. L., Koshovyy V. V., Lozynskyi A. B., Nazarchuk Z. T., Romanyshyn I. M., Soroka S. O. Methods of estimation of the infrasonic environment on the ground surface based on acousto-electromagnetic monitoring of the ionosphere [in Ukrainian].

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

- 19. Selivanov Ju. O., Rapoport Ju. G., Cheremnyh O. K. (2018). Ionospheric response to acoustic action according to the data of micrometers DEMETER and Chibis-M. *Space Science and Technology*, **24** (6), 41–56 [in Ukraine].
- 20. Hrgian A. H., Kuznecov G. I. (1996). Atmospheric ozone, its variations and geophysical relations. *Interaction in the "lithosphere hydrosphere atmosphere" system*. Moscow: Nedra, 241–267.
- Cheremnykh O. K., Klimov S. I., Korepanov V. E., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Mezentsev V. P., Nogach R. T., Rapoport Yu. G., Selivanov Yu. A., Semenov L. P. (2014). Ground – space experiment for artificial acoustic modification of the ionosphere. Some preliminary results. *Space Science and Technology*, **20** (6), 60–73 [in Russian].
- 22. Chernogor L. F. (1997). Infrasound impact of earthquakes and their precursors on the parameters of near Earth space. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **2** (4), 463–472 [in Russian].
- 23. Chernogor L. F. (1999). Energetics of processes in the atmosphere and near Earth space in the light of the project «Warning». *Space Science and Technology*, **5** (1), 38–47 [in Russian].
- 24. Chernogor L. F. (2003). Physical processes in the near Earth environment that accompanied hostilities in Iraq (March April 2003). *Space Science and Technology*, **9** (2/3), 13–33 [in Russian].
- 25. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and geoecological consequences of mass chemical explosions in military warehouses in city Artyomovsk. *Geophysical J.*, **26** (4), 31–44 [in Russian].
- Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and environmental consequences of fire and explosions at the military base near Melitopol. *Geophysical J.*, 26 (6), 61–73 [in Russian].
- 27. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of mass chemical explosions in a technological catastrophe. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 6, 522–535 [in Russian].
- Chernogor L. F. (2006). Tropical cyclone as an element of the Earth system. *Space Science and Technology*, 12 (2/3), 16–26 [in Russian].
- 29. Chernogor L. F. (2008). Geoecological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 4, 359–369 [in Russian].
- 30. Chernogor L. F. (2008). On the nonlinearity in nature and science. Monograph. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University [in Russian].
- Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Monograph. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
- 32. Chernogor L. F. (2017). Largest arsenal ammunition catastrophe. Sci. and Tekh., 5 (132), 4-10 [in Russian].
- 33. Chernogor L. F. (2017). Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. Radiophysics and Radioastronomy, 22 (1), 53-66 [in Russian].
- Chernogor L. F. (2018). Statistical Characteristics of Meteoroid Parameters in the Earth's Atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 34 (3), 134–146 [in Russian].
- Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 35 (4), 174–188. Part 2. 35 (5), 217–230. Part 3. 35 (6), 271–285 [in Russian].
- Chernogor L. F. (2019). Possible Generation of Quasi Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59 (3), 374–382.
- 37. Chernohor L. F., Liaschuk A. Y., Shevelev N. B. (2018). Parameters of infrasound signals in the atmosphere generated by massive explosions in the ammunition arsenal. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (4), 280–293 [in Russian].
- 38. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2017). Global'naja statistika bolidov v atmosfere Zemli [Global statistics of bolides in the terrestrial atmosphere]. *Radiophysics and Radioastronomy*, **22**(2), 138–145 [in Russian].
- Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2017). Dependence of the amplitude of the infrasonic signal generated by the explosion of a powerful volcano, on the distance. *Karazin National University Bulletin. Ser. Radiophysics and Electronics*, 27, 57–60 [in Russian].
- 40. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Characteristics of the infrasound signal generated by the Chelyabinsk space body: global statistics. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (1), 24–35 [in Russian].
- 41. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Dependence of the amplitude of the infrasonic wave generated by the Tungus cosmic body, from a distance. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (2), 94–103 [in Russian].
- 42. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (3), 59–75 [in Russian].
- 43. Chornohor L. F., Liaschuk O. I., Shevelev M. B. (2018). Parameters of infrasonic signals in the atmosphere caused by a technogenic catastrophe near Vinnitsa: results and processing of data from the Ukrainian microbarographs net. Fifth Conf. "Computational methods and systems of information transformation". Collection of papers. L'viv, 2018: Karpenko FMI of the NASU, 99–103 [in Ukrainian].
- 44. Arrowsmith S. J., ReVelle D. O., Edwards W. N., Brown P. G. (2008). Global detection of infrasonic signals from three large bolides. *Earth, Moon, and Planets*, **102**(№ 1–4), 357–363.
- 45. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. (1979). J. Geophys. Res., 84C (№ 4), 1735–1745.

- 46. Balachandran N. K., Donn W. L. (1971). Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophys. J. International*, 26 (№ 1–4), 135–148.
- 47. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. (1977). Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*, **197** (№ 4298), 47–49.
- 48. Blanc E. (1985). Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. *Ann. Geophys.*, **3**, 673–688.
- 49. Blaunstein N. (2001). Method of earthquake prediction. The United States Patent No.: US 6,246,964 B1.
- 50. Brown P., Pack D., Edwards W. N., Revelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. (2004). The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, **39**, № 11, 1781–1796.
- 51. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. (2015). Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **33** (№ 6), 276–290
- 52. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Rozumenko V. T., Shevelev M. B. (2018). *Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv Un-ty, Kyiv, Ukraine, May 29—June 01, 2018. Book of Abstracts, 87–88.
- Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2019). Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot. Proceedings of the XIX Intern. young scientists' conference on applied physics (May 21-25, 2019). Kyiv, 2019, 100-101.
- 54. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (3), 147–160.
- 55. Chernogor L. F., Qiang Guo, Rozumenko V. T., Shevelev M. B. (2018). The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*, Kyiv, Ukraine, May 29–June 01, 2018. Book of Abstracts, 89–90.
- 56. Che Y., Park J., Kim I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophysical J. International*, **198**, № 1, 495–503.
- 57. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. (1993). The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, **36**1 (№ 6407), 40–44.
- 58. Cook R. K., Young J. M. (1962). Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. Sound: Its Uses and Control, 1 (3), 25-33.
- 59. Donn W. L. (1978). Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *American Scientist*, **66** (№ 6), 724–733.
- 60. Donn W. L., Balachandran N. K. (1981). Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Airwaves and explosive yield. *Science*, **213** (№ 4507), 539–541.
- 61. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., Balachandran N. K. (1967). Infrasound at long range from Saturn V, 1967. *Science*, **162** (№ 3858), 1116–1120.
- 62. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. (2006). Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 68, 1136–1160.
- 63. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., Hamama I. H. (2017). Infrasound detection of meteors. *NRIAG J. Astronomy* and Geophysics, 6 (№ 1), 68–80.
- Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N. (2012). Infrasound production by bolides: A global statistical study. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 80, 208–229.
- Galperin Yu., Hayakawa M. (1996). On Magnetospheric Effects of Experimental Ground Explosions Observed From AU-REOL-3. *Geoelectric*, 48, 1241–1263.
- 66. Galperin Yu., Hayakawa M. (1998). On possibility of parametric amplifier in the stratosphere mesosphere suggested by active MASSA experiments with the AUREOL-3 satellite. *Earth Planets Space*, **50**, 827–832.
- 67. Gi N. (2017). Using Bolide Airwaves To Estimate Meteoroid Source Characteristics and Window Damage Potential. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 4688, 165 p. URL: https://ir. lib. uwo. ca/etd/4688 (Last accessed 17.07.2019).
- 68. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2000). Lithosphere ionosphere coupling and its modeling. *Russian J. Earth Sciences*, **2**, 95–108.
- 69. Gotynyan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G., Parrot M. (2003). Ionospheric disturbances excited by the lithospheric gas source of acoustic gravity waves before earthquakes. *Space Science and Technology*, **9**, Suppl. No. 2, 89–105.
- Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Perez-Enriquez R., Kotsarenko A. (2006). Increase of the Transparency for Cosmic Radio Waves due to the Decrease of Density of the Ionosphere Caused by Acoustic Waves. *Physica Scripta*, 72 (1), 91.
- Koshevaya, S., Kotsarenko, Yu., Escobedo, J. A., Kotsarenko and Yutsis, V. A. (2014). Cosmic Radio Waves Caused by Seismic Volcano Activities. *J. Electromagnetic Analysis and Applications*, 6, 335–341. URL: http://www.scirp.org/journal/ jemaa, http://dx. doi. org/10. 4236/jemaa. 2014. 611034 (Last accessed 17.07.2019).

- 72. Koshevaya S., Makarets N., Grimalsky V., Kotsarenko A., Perez Enríquez R. (2005). Spectrum of the seismic-electromagnetic and acoustic waves caused by seismic and volcano activity. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 5 (2), P. 203-209. HAL Id: hal-00299144. URL: https://hal.archives-ouvertes. fr/hal-00299144 (Last accessed 17.07.2019).
- Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L., Lozynskyi A. B., et al. (1997). Radiophysical complexes for cosmic investigations based on Ukrainian radiotelescope URAN-3. *Asta Cosmologica*. FASCICULUS XXIII-2, 67–70.
- 74. Kotsarenko N. Ya., Soroka S. A., Koshevaya S. V., Koshovyy V. V. (1999). Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave. *Physica Scripta*, **59** (№ 2), 174–181.
- 75. Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. (2014). Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes. *Acoust. Physics*, **60** (No. 1), 19–28. DOI: 10. 1134/S1063771013060109.
- Landès, M., Ceranna L., Le Pichon A. (2012). Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. J. Geophys. Res., 117D (No. 6). DOI: 10. 1029/2011JD016684.
- 77. Le Pichon A., Blanc E. Hauchecorne A. (Eds). (2010). Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. New York: Springer Science+Business Media, 735 p.
- 78. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. (2008). Physical models of coupling in the lithosphere atmosphere ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48** (№ 6), 795–806.
- 79. Liszka L. (2008). Infrasound: a summary of 35 years of infrasound research. Swedish Institute of Space Physics. 150 p.
- 80. Meteor Infrasound. What is Infrasound? The Department of Physics and Astronomy, the University of Western Ontario, Meteor Physics. URL: http://meteor.uwo.ca/research/infrasound/is_whatisIS. html (Last accessed 17.07.2019 p.)
- 81. Olson J. (2012). Infrasound rocket signatures. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 1, 82.
- 82. Parrot M., Hayosh M., Soroka S. O. (2007). Acoustic experiments in the ionosphere with the DEMETER satellite. EGU General Assembly, Vienna, 15–20 April 2007, 1607-7962/gra/EGU2007-A-04428.
- 83. Pichon A., Garcés M., Blanc E., Barthelemy M., Drob P. (2002). Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. J. Acoustical Soc. Amer., 111 (№ 1), 629–641.
- Ponomarev E. A., Erushchenkov A. I. (1978). Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). Radiophysics and Quantum Electronics, 20 (№ 12), 1218–1229.
- 85. Proksch N. (2017). *Lightning detection with infrasound*. Master's Thesis. Utrecht University. Royal Netherlands Meteorological Institute, 53 p.
- Rapoport V. O., Bespalov P. A., Mityakov N. A., Parrot M., Ryzhov N. A. (2004). Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66(12), 1011–1017. DOI 0. 1016/j. jastp. 2004. 03. 010.
- Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Mezentsev V. P., Karataeva L. M., Ivchenko V. M., Milinevsky G. P., Fedun V. N., Tkachenko E. N. (2017). Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. *Ann. Geophys.*, 35, 53–70. DOI: 10. 5194/angeo-35-53-2017.
- Reed J. W. (1987). Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. J. Geophys. Res., 92D (№ 10), 11979–11992. DOI: 10.1029/JD092iD10p11979.
- Sakurai A. (1965). Blast wave theory. Basic developments in fluid dynamics. Holt M. (ed). New York: Academic Press, Vol. 1, 309–375.
- Savina O. N., Bespalov P. A. (2015). Ionospheric Response to the Acoustic Gravity Wave Singularity. *Acta Geophysica*, 63(1), 319–328 DOI: 10. 2478/s11600-014-0246-1. URL: http://creativecommons. org/licenses/by-nc-nd/3. 0/ (Last accessed 17.07.2019).
- 91. Silber E. A., Brown P. G. (2014). Optical observations of meteors generating infrasound. I. Acoustic signal identification and phenomenology. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **119**, 116–128.
- 92. Silber E. A., Brown P. G., Krzeminski Z. (2015). Optical observations of meteors generating infrasound: weak shock theory and validation. J. Geophys. Res.: Planets, 120 (№ 3), 413–428.
- 93. Silber E. A. (2014). Observational and Theoretical Investigation of Cylindrical Line Source Blast Theory Using Meteors. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, Paper 2112, 582 p.
- 94. Soroka S. O., Kalita B. I., Karataeva L. M., et al. (2006). Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. *International Conference DEMETER*, Toulouse, 14–16 June 2006.
- 95. Whipple F. J. W. (1930). The great Siberian meteor, and the waves, seismic and aerial, which it produces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **56** (№ 236), 287–301.

Received 17.07.2019

*В. В. Кошовый*¹, вед. науч. сотруд., канд. техн. наук. Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovyy@gmail.com

*О. Л. Ивантишин*¹, зав. лаб., канд. техн. наук

*Р. Т. Ногач*², науч. сотруд.

*Л. Ф. Черногор*³, д-р физ.-мат. наук, проф., Лауреат Государственной премии УРСР в области науки и техники, дважды Лауреат Премии Совета Министров СССР, Лауреат Премии МВССО СССР,

Заслуженный деятель науки и техники Украины

*3. Т. Назарчук*¹, директор, д-р физ.-мат. наук, проф., акад. НАН Украины. Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины

*H. О. Мельник*², зав. отделом, канд. техн. наук

Б. И. Калита², зам. зав. отделом

*Б. С. Харченко*¹, зав. сектором

И. М. Романишин¹, старш. науч. сотруд., канд. техн. наук

*А. Б. Лозинский*¹, мл. науч. сотруд.

*Б. П. Русин*¹, зав. отделом, д-р техн. наук, проф.

*Л. М. Каратаева*², мл. науч. сотруд.

3. И. Любинецкий², зам. зав. лаб.

Л. В. Алёхина², зав. лаб.

*В. К. Липский*², зав. сектором

¹ Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины

ул. Наукова 5, Львов, Украина, 79053

² Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины

ул. Наукова 5А, Львов, Украина, 79060

³ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022

ИСКУССТВЕННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЫ

Статья посвящена исследованию некоторых возможностей реализации искусственной акустической модификации околоземной среды от поверхности Земли до ионосферных высот, используя наземный управляемый акустический излучатель инфразвукового диапазона. Проанализированы результаты предыдущих исследований, а также рассмотрены характерные параметры инфразвука, генерируемого природными явлениями и рукотворными процессами, а также особенности его влияния на состояние околоземной среды. Обоснованы основные условия реализации искусственной акустической модификации ионосферы. Приведены и обсуждены результаты первого этапа верификации предложенной методологии. Для ее верификации использованы: радиоастрономический метод дистанционного зондирования ионосферы, радиоизлучение космических радиоисточников как зондирующее, наземный комплекс акустико-электромагнитного зондирования ионосферы в составе радиотелескопа УРАН-3 и наземного управляемого акустического излучателя параметрического типа. Первый этап верификации проводили на частотах, близких к верхней границе инфразвукового диапазона (~30 Гц). Предварительный анализ полученных результатов подтвердил, что уже в случае наземной генерации инфразвука с частотой $f \sim 30$ Гц в околоземном пространстве могут существовать условия, позволяющие реализовать управляемую акустическую модификацию ионосферы и выявлять слабые акустико-ионосферные возмущения. Последние могут формироваться в ионосфере при определенных состояниях плазмы, а также при состояниях среды приземной и верхней атмосферы, которые, в свою очередь, определяют погодные условия в приземном слое и влияют на параметры генерации и распространения атмосферных акустических волн. Следующий этап работы предполагает исследование возможностей реализации искусственной акустической модификации ионосферы с использованием наземного управляемого акустического излучателя в частотном диапазоне 2...10 Гц.

Ключевые слова: околоземное пространство, искусственная акустическая модификация ионосферы, наземный управляемый акустический излучатель, радиотелескоп УРАН-3, акустико-ионосферные возмущения, радиоастрономический метод, трансмиссионный радиосигнал, расширенный спектральный анализ.

V. V. Koshovyv¹, Chief Researcher, Cand. Sci. in Engineering, Laureate of the State Prize in Science and Technology, Head of the Shatsk Interdepartmental Scientific Research Laboratory of Ecology E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovyy@gmail.com O. L. Ivantyshyn¹, Head of Laboratory, Cand. Sci. in Engineering *R. T. Nogach*², Researcher L. F. Chernogor³, Dr. Sci., Professor r, Laureate of the State Prize in Science and Technology of the Ukrainian SSR, twice Laureate of the USSR Council of Ministers Prize, Laureate of the USSR MVSSO Prize, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine Z. T. Nazarchuk¹, Director of Institute, Acad. NAS of Ukraine, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor M. O. Melnyk², Head of Department, Cand. Sci. in Engineering B. I. Kalita², Deputy Head of Department B.C.Kharchenko¹, Head of Division I.M. Romanyshyn¹, Senior Researcher, Cand. Sci. in Engineering A. B. Lozynskyi¹, Research Assistant B. P. Rusyn¹, Head of Department, Dr. Sci. in Engineering, Professor L. M. Karatayeva², Research Assistant Z. I. Lyubinetsky², Deputy Head of Laboratory L. V. Alyohina², Head of Laboratory V. K. Lipsky², Head of Section of devices construction ¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine 5 Naukova Str., L'viv, 79053 Ukraine ² L'viv Center of the Space Research Institute of the NAS of Ukraine and SSA of Ukraine 5A, Naukova Str., L'viv, 79060 Ukraine ³ V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

ARTIFICIAL ACOUSTIC MODIFICATION OF THE NEAR-EARTH ENVIRONMENT

The article is devoted to the study of some possibilities of implementing artificial acoustic modification of the near-Earth medium from the Earth's surface to ionospheric heights using a ground-based controlled acoustic infrasonic emitter. The results of previous studies are analyzed, and the characteristic parameters of infrasound generated by natural phenomena and man-made processes, as well as the features of its influence on the state of the near-Earth environment, are examined. The basic conditions for the implementation of artificial acoustic modification of the ionosphere are substantiated. The results of the first stage of the verification of the proposed methodology are presented and discussed. For the verification, we used: the radio astronomy method of remote sensing of the ionosphere, the radio emission of space radio sources as sounding ones, the ground-based complex of the acoustic-electromagnetic sounding of the ionosphere as a part of the URAN-3 radio telescope and the groundbased acoustic emitter of the parametric type. The first stage of the verification was carried out at frequencies close to the upper boundary of the infrasound range (\sim 30 Hz). A preliminary analysis of the obtained results confirmed that even in the case of ground-based infrasound generation with a frequency of $f \sim 30$ Hz, conditions might arise in the near-Earth space that allow the realization of controlled acoustic modification of the ionosphere and the detection of weak acoustic-ionospheric disturbances. The latter can be formed in the ionosphere under certain plasma conditions, as well as in environmental conditions of the surface and upper atmosphere, which, in turn, determine the weather conditions in the surface layer and affect the parameters of generation and propagation of atmospheric acoustic waves. The next stage of the work will involve the study of the possibilities of implementing artificial acoustic modification of the ionosphere using a ground-based controlled acoustic emitter in the frequency range 2...10 Hz.

Keywords: near-Earth space, artificial acoustic modification of the ionosphere, ground-based controlled acoustic emitter, URAN-3 radio telescope, acousto-ionospheric disturbances, radio astronomy method, transmission radio signal, advanced spectral analysis.

https://doi.org/10.15407/knit2020.02.059 УДК 533.95

В. А. ШУВАЛОВ¹

зав. отделом, д-р техн. наук, проф., Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники и премии НАН Украины им. М. К. Янгеля E-mail: vashuvalov@ukr.net

В. Г. СИМАНОВ² вед. конструктор П. Г. ХОРОЛЬСКИЙ² вед. науч. сотруд., канд. техн. наук С. Н. КУЛАГИН¹ старш. науч. сотруд., канд. техн. наук, старш. науч. сотруд. ¹ Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины ул. Лешко-Попеля 15, Днипро, Украина, 49005 ² ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

ул. Криворожская 3, Днипро, Украина, 49008

О ТОРМОЖЕНИИ ИСКУССТВЕННО «НАМАГНИЧЕННОГО» КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

По результатам физического (стендового) моделирования динамического взаимодействия «намагниченного» тела с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы в ионосфере Земли получены зависимости коэффициента силы сопротивления от отношения магнитного давления к скоростному напору, от угла между векторами скорости потока плазмы (полёта КА) и индукции собственного магнитного поля, а также отношения характерного размера возмущенной зоны при обтекании «намагниченного» тела к его линейному размеру. Определена зависимость электромагнитной силы, тормозящей КА на высоте около 700 км, от индукции его собственного магнитного поля. Для диапазона высот 250...1000 км в ионосфере Земли показано, что электромагнитная сила, генерируемая при взаимодействии собственного магнитного поля КА (≥ 0.8 Гл) с окружающей плазмой, сопоставима с импульсом, инжектируемым плазменными ускорителями специальных космических аппаратов. Такие аппараты предназначены для принудительной «активной» очистки околоземного пространства от крупных объектов космического мусора с линейным размером более 0.5 м (топливных баков, последних ступеней ракет-носителей, обтекателей, исчерпавших ресурс КА и т. д.). Процедура очистки предусматривает торможение объектов космического мусора плазменной струей, увод их на более низкие орбиты и последующую утилизацию при сгорании в плотных слоях атмосферы Земли. При индукции собственного магнитного поля КА более 0.8 Тл электромагнитная сила более чем на три порядка превосходит силу торможения КА, обусловленную воздействием нейтрального компонента частично ионизованной ионосферной плазмы на высотах более 700 км. Применение электромагнитной силы, генерируемой в системе «намагниченный КА — ионосферная плазма» может стать альтернативой технологиям «активной» (плазменные струи специальных КА) и «пассивной» (надувные конструкции КА) очистки околоземного пространства от объектов космического мусора на высотах 250...1000 км.

Ключевые слова: космический annapam, ионосферная плазма, магнитное поле, электромагнитная сила, торможение, космический мусор.

Цитування: Шувалов В. А., Симанов В. Г., Хорольский П. Г., Кулагин С. Н. О торможении искусственно «намагниченного» космического аппарата в ионосферной плазме. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2 (183). С. 59—71. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.059

введение

Наличие в околоземном пространстве более 10000 объектов «космического мусора» (ОКМ) фрагментов изделий ракетно-космической техники, последних ступеней ракет-носителей, топливных баков, отработавших ресурс космических аппаратов — является опасным фактором для функционирования космических аппаратов в ионосфере Земли. В последние годы возросло количество проектов, рассматривающих «очистку» околоземного пространства посредством увода ОКМ на более низкую орбиту с последующим сгоранием их в плотных слоях атмосферы Земли. К ним относятся проект European Space Agency LEOSWEEP [6, 29] для ионосферы Земли и японский проект [19] для геостационарной орбиты, предусматривающие торможение ОКМ с помощью плазменной струи, генерируемой электрореактивным двигателем (ЭРД) или плазменным ускорителем, размещенным на специальном КА «Пастух». Для воздействия на ОКМ предполагается использовать ионы Xe⁺ плазменной струи с энергией 1...6 кэВ [19]. На расстоянии минимально безопасного сближения с объектом космического мусора (от 7 до 20 м [22]) независимо от типа ЭРД концентрация высокоэнергичных ионов Xe^+ не превосходит 10^7 см⁻³. Поэтому, например, при уводе ОКМ с орбиты 650 км на высоту 300 км длительность воздействия ионов Хе⁺ на объект может достигать 100 и более суток [6, 22]. КА «Пастух» должен в течение этого времени обеспечивать непрерывное облучение ОКМ ионами плазменной струи, т. е. сопровождать ОКМ в течение всего времени перехода его на более низкую орбиту. Перевод ОКМ на более низкую орбиту с применением дополнительного тормозящего импульса, создаваемого плазменной струёй, можно рассматривать как «активное торможение» в ионосфере Земли. Концептуально такие проекты близки к идее торможения ОКМ в атмосфере Земли с применением надувных конструкций путем увеличения площади поверхности ОКМ и, как следствие, увеличения силы сопротивления изза воздействия нейтрального компонента атмосферы Земли (пассивное торможение) [12].

В данной работе для торможения ОКМ в ионосфере предлагается использовать его собственное магнитное поле — электромагнитную силу, генерируемую в системе «магнитное поле ОКМ — ионосферная плазма» (пассивное торможение). При этом первоочередной задачей для оценки эффективности такого режима торможения ОКМ является собственно задача определения электромагнитной силы, генерируемой при взаимодействии собственного магнитного поля КА с ионосферной плазмой.

Цель данной работы:

• посредством физического (стендового) моделирования взаимодействия «намагниченного» тела с гиперзвуковым потоком ионосферной разреженной плазмы определить электромагнитную силу и её зависимость от угла θ между векторами скорости U_{∞} потока плазмы (полёта ОКМ) и индукции B_W магнитного поля;

• оценить эффективность использования электромагнитной силы в качестве дополнительной силы торможения КА по сравнению с силой сопротивления, создаваемой плазменной струёй (активное торможение) и надувными конструкциями (сила воздействия нейтральных частиц атмосферы Земли).

ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПЛАЗМОЙ

Ионосфера. В ионосферной разреженной плазме на высотах около 700 км для «ненамагниченного» тела ($\mathbf{B}_W = 0$) с линейным размером $r_W = 0.5...1.0$ м реализуются следующие условия динамического взаимодействия [2]: магнитное число Рейнольдса $\operatorname{Re}_m = \mu \sigma U_{\infty} r_W > 1$; отношение тепловых ларморовских радиусов ионов r_i и электронов r_{ρ} к характерному размеру тела $r_i / r_W >> 1$, $r_e / r_W << 1$ и $r_{iU} / r_W >> 1$, *r*_{*i*II} — ларморовский радиус ионов ионосферной плазмы, взаимодействующих с поверхностью тела со скоростью $U_{\infty} \approx 7.5$ км/с; σ — проводимость плазмы; µ — магнитная проницаемость. Для ионосферы характерно: отношение размера тела к дебаевскому радиусу в невозмущенной плазме $r_W / \lambda_d \ge 100$; число Маха 5.3 \le M \le 7.5; степень ионизации $0.05 \le \varepsilon_i \le 0.4$; параметр Холла $\omega_{\alpha\beta}v_{\alpha\delta}^{-1} >> 1$, где $\omega_{\alpha\beta}$ — ларморовская

(циклотронная) частота ионов ($\alpha = i$) и электронов ($\alpha = e$); $v_{\alpha\delta} = v_{\alpha i} + v_{\alpha n}$ — средние частоты соударений электронов и ионов с ионами и нейтралами соответственно [2]. В ионосферной плазме для тел с $r_W = 0.5...1.0$ м и чисел Кнудсена для ионов Kn_i = $l_{ii} / r_W >> 1$, где l_{ii} — длина свободного пробега для ион-ионных соударений, реализуется режим бесстолкновительного (свободно-молекулярного) обтекания и частично выполняются условия магнитогидродинамического (МГД) приближения [23]:

1) $\tau_{Ri} >> \omega_{ep}^{-1}$, где $\tau_{Ri} = 2r_W / U_{\infty}$ — временной масштаб макроскопических изменений в плаз-

ме, ω_{ep} — плазменная (ленгмюровская) частота; 2) $\tau_{Ri} >> \nu_{e\delta} / \omega_{ep}^2$, условие $\tau_{Ri} >> \nu_{e\delta}^{-1}$ на высотах 700 км не выполняется.

Физическое (стендовое) моделирование. Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде Института технической механики. Система безмасляной откачки и наличие криопанелей, охлаждаемых жидким азотом, обеспечивают в вакуумной камере (цилиндре диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м) остаточное давление 5·10⁻⁵ H/м². По результатам масс-спектроскопического анализа в остаточном газе преобладают два компонента: СО+N₂ и Н₂, в небольшом количестве есть водяной пар H_2O и CO_2 . При рабочем давлении 4 м H/m^2 в струе плазмы (рабочий газ — азот высшей очистки) преобладающим компонентом являются ионы азота. Степень диссоциации ионного компонента $\xi_{di} \approx 0.6$, средняя молекулярная масса ионов $m_i = 19.6$ а. е. м. В рабочей камере стенда реализованы потоки плазмы со следующими значениями параметров: концентрация ионов $2.1 \cdot 10^{15} \le N_i \le 9.6 \cdot 10^{15}$ м⁻³, скорость направленного движения ионов $U_i \approx 15.6$ и 28.3 км/с, температуры электронов $T_e \approx 2.6$ эВ, ионов $T_i \approx$ ≈ 0.52 эВ и нейтральных частиц $T_n \approx 0.18$ эВ, скорость движения нейтралов $U_n \approx 0.6$ км/с, степень ионизации $0.01 \le \varepsilon_i \le 0.1$, проводимость плазмы 1900 $\leq \sigma \leq 3300$ Ом⁻¹м⁻¹; индукция внешнего магнитного поля в рабочем сечении струи $B_0 = 0.2$ мТл, диаметр рабочего сечения струи 35 см (рабочее сечение струи — область с равномерным распределением скорости, концентрации ионов и индукции внешнего магнитного поля); скоростной напор ионов $8.3 \le P_d \le 130 \text{ мH/m}^2$ ($P_d = \rho_i U_i^2 / 2$). Для измерения параметров плазмы использовались микроволновый интерферометр, работающий на частоте 5.45 ГГц; система электрических зондов (цилиндрический, плоский, многоэлектродный зонд-анализатор); цилиндр Фарадея и двухканальный зонд давления [30]. Зонды установлены на подвижной платформе, перемещающейся в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также вращающейся вокруг вертикальной оси. Погрешность измерения линейных перемещений порядка 0.5 мм, угловых — 0.5°. Состав остаточного газа и степень диссоциации ионного компонента контролируются масс-спектрометром.

В качестве исследуемого тела использовались две диэлектрические сферы (фторопласт-4) с радиусами $r_{W1} = 4.35$ см и $r_{W2} = 5.25$ см. В аэродинамике разреженных газов хаотично вращающееся тело при гиперзвуковом обтекании газовым потоком моделируется сферой [1]. На стенде в потоке разреженной плазмы для «ненамагниченных» сфер выполнялись те же условия МГД-приближения, что и для КА в ионосфере. Точность и чистота физического (лабораторного) моделирования, эксперимента определяется безразмерными параметрами подобия и безразмерными масштабными коэффициентами. При физическом моделировании процессов и явлений, протекающих в космическом пространстве вообще, и в ионосфере в частности, необходимо, чтобы безразмерные параметры, входящие в уравнения, описывающие конкретное явление в ионосфере, были близки по порядку величин или одинаковы в ионосфере и на стенде. При этом, если какой-либо безразмерный параметр в ионосфере на несколько порядков меньше или больше единицы, то и в модельном эксперименте этот параметр должен быть соответственно мал или велик по сравнению с единицей [3, 4].

Значения параметров, характеризующих взаимодействий КА с линейным размером $r_W \approx 1.0$ м в ионосфере и сферических моделей КА на стенде ИТМ приведены в табл. 1. При оценке значений безразмерных параметров подобия и безразмерных масштабных коэффициентов для КА использовались значения параметров ионо-

Модель	$S_{ie} = U_{\infty} \sqrt{kT_e / M_i}$	Kn _i	Re _m	<i>М_і</i> , а. е. м.	ε_i	Φ_W
КА — плазма Сфера — плазма	5.87.3 4.48.0	40006000 80100	1.73.6 1.34.8	14.0 19.6	0.030.08 0.0140.090	-2.12.4 -2.93.6
Модель	r_W/λ_d	r_W/r_{iT}	$r_W/r_{iU\infty}$	r_W/r_e	$\omega_{eB} v_{em}^{-1}$	$\omega_{iB} v_{im}^{-1}$
КА — плазма Сфера — плазма	100120 150380	0.200.25 0.0190.025	$3.8 \cdot 10^{-3} (1.63.6) \cdot 10^{-3}$	2430 1.61.9	$(1.29) \cdot 10^4$ 1400	700 110

Таблица 1. Значения параметров, характеризующие динамическое взаимодействие «КА — плазма» в ионосфере на высоте 700 км и на стенде ИТМ, «модель КА (сфера) — плазма»

сферной плазмы день-ночь при среднем уровне солнечной активности из работ [2, 7, 8], а также данные модели International Reference Ionosphere (IRI-2016).

Для параметров, характеризующих динамическое взаимодействие «ненамагниченных» ($B_W = 0$) тел с гиперзвуковым потоком плазмы, условия на стенде близки или соответствуют условиям взаимодействия ОКМ с ионосферной разреженной плазмой на высотах 700 км.

ТОРМОЖЕНИЕ «НАМАГНИЧЕННОГО» ТЕЛА В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ

Для сферы радиусом $r_{W1} = 4.35$ см в качестве источника собственного магнитного поля использовался соленоид с внешним диаметром $D_{s1} = 5$ см, длиной $l_{s1} = 5.5$ см и внутренним диаметром $d_{s1} = 2$ см, а для сферы радиусом $r_{W2} =$ = 5.25 см — соленоид диаметром $D_{s2} = 6$ см, длиной $l_{s2} = 7$ см и $d_{s2} = 1.5$ см. Индукция магнитного поля на поверхности сферы при кратковременном пропускании тока силой до 10 А достигает максимальных значений $B_W^{\max} \approx 200$ мTл, а при токе 0.5 А — минимальных $B_W^{\min} \approx 1 \text{ мTл}$ и 30 $\leq P_{BW} / P_d \leq 2 \times 10^5$, где $P_{BW} = B_W^2 / (2\mu)$ магнитное давление. Индукция магнитного поля измерялась универсальным тесламетром типа 43205 с диапазоном измерения от 10^{-5} до 3.5 Тл. Распределение осевой В_г и радиальной В_о составляющих магнитного поля на расстоянии $z / r_W \ge 1.0$ и $\rho / r_W \ge 1.0$ от центра сферы соответствуют структуре поля магнитного ди-поля $B_z = P_m / (2\pi z^3)$ и $B_p = P_m / (4\pi \rho^3)$. Внутри диэлектрических сфер соленоиды термоизолированы: покрыты экранно-вакуумной теплоизоляцией и помещены в герметичный корпус из алюминиевой фольги толщиной 0.3 мм. Механический контакт внутренней поверхности сферы с источником собственного магнитного поля обеспечивается через сетчатый диэлектрический каркас. Измерения проводятся в автоматическом режиме. Применялись микровесы двух типов:

а) микровесы компенсационного типа с магнитоэлектрической системой управления. Компенсационный ток прямо пропорционален силе воздействия потока плазмы на сферу. На плече длиной 0.5 м диапазон измеренных сил изменяется в пределах от 10^{-8} до 10^{-3} H, погрешность измерения не более ±4.5 %. При измерениях силового воздействия потока плазмы на сферу для повышения чувствительности микровесов компенсационного типа, уменьшения вклада нейтральных частиц и метастабильных атомов, влияния тепловых флуктуаций державка сферы была защищена от контакта с потоком плазмы диэлектрическим экраном, а магнитоэлектрическая система весов помещена в диэлектрический корпус;

б) микровесы с повышенной помехозащищенностью к воздействию внешних электрических и магнитных полей. Измерительным элементом этих микровесов служит тензометрический датчик. Сигнал с тензометрического датчика пропорционален деформации плеча, вызванной воздействием внешней силы. Диапазон



Рис. 1. Обтекание сферы гиперзвуковым потоком плазмы: a — «ненамагниченная» сфера ($B_W = 0$), δ , s — «намагниченная» сфера ($B_W \neq 0$) для случаев $\mathbf{U}_{\infty} \downarrow \uparrow \mathbf{B}_W$, $\theta = 0^{\circ}(\delta)$ и $\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_W$, $\theta \approx 80^{\circ}(s)$



Рис. 2. Схемы токов и сил для системы «поток плазмы — магнитное поле»: $a - случай \mathbf{U}_{\infty} \downarrow \uparrow \mathbf{B}_{W}, \delta - случай \mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_{W}$

измеряемых сил — от 10^{-6} до 0.1 H, погрешность измерения силы — не более ± 3 %.

Структура поля течения при обтекании сферы гиперзвуковым потоком разреженной плазмы при ($P_{BW} / P_d \approx 4800$) показана на рис. 1: «ненамагниченная» сфера радиусом $r_{W1} = 4.35$ см (рис. 1, a); «намагниченная» сфера (рис. 1, δ , s) для углов $\theta \approx 0^{\circ}$ и $\theta \approx 80^{\circ}$ между вектором скорости ионов набегающего потока $\mathbf{U} = \mathbf{U}_{\infty}$ и вектором индукции собственного магнитного поля **В**_W. При $\theta \approx 0$ (**U**_∞ $\downarrow \uparrow$ **B**_W, осевая ориентация) вблизи поверхности «намагниченной» сферы формируется струйное течение с отошедшей бесстолкновительной ударной волной (рис. 1, б). При $\theta \approx \pi / 2$ ($\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_W$, нормальная ориентация) у поверхности «намагниченной» сферы формируется искусственная мини-магнитосфера (рис. 1, в).

Схемы токов и сил для системы «поток плазмы — магнитное поле» при $U_{\infty} \downarrow \uparrow B_W$ и $U_{\infty} \perp B_W$ показана на рис. 2, *а* и *б* соответственно.

Коэффициент силы сопротивления «ненамагниченной» сферы определяют две составляющие: коэффициент c_{0x} силы контактного взаимодействия ионов с поверхностью сферы и коэффициент $c_{\Phi x}$ кулоновской составляющей силы сопротивления. Для сферы большого размера ($r_W / \lambda_d >> 10$) в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы

$$c_{\Phi x} / c_{0x} \approx 1 - \exp\{-\Phi_W^{0.5} / [0.233(r_W / \lambda_d)]\} \eta^{2/3},$$

$$\Phi_W = e \phi_W / (kT_e) = -\ln\{kT_e / [2(\pi m_e U_i^2)]\},$$

где *е* — заряд электрона, $\phi_W = \phi_s - \phi_0$ — потенциал поверхности сферы ϕ_s относительно потенциала плазмы ϕ_0 , *k* — постоянная Больцма-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2



Рис. 3. Зависимость коэффициента силы сопротивления c_x / c_{0x} «намагниченной» сферы при обтекании гиперзвуковым потоком разреженной плазмы от параметра P_{BW} / P_d . Режим 1: концентрация $N_i = 2.1 \cdot 10^{15}$ м⁻³ и направленная скорость ионов $U_i = 15.6$ км/с; режим 2: $N_i = 9.6 \cdot 10^{15}$ м⁻³ и $U_i = 28.3$ км/с. Верхняя кривая осевая ориентация $\mathbf{U}_{\infty} \downarrow \uparrow \mathbf{B}_W$, *1*, 2 — измерения авторов для сферы r_{W1} = 4.35 см (режим 1, 2); 3, 4 — сфера радиусом $r_{W2} = 5.25$ см (режим 1, 2); 5 — сфера, расчёт [9]; 6 — численное моделирование [26]; 7 — расчёт [5]; 8 — полусфера с цилиндрической юбкой, расчет [16], 9 — полусфера с цилиндрической юбкой, измерения [17], 10 — аппроксимация (1), нижняя кривая — ортогональная ориентация $\mathbf{U}_{\infty}\downarrow\uparrow\mathbf{B}_{W}$, 11, 12 — измерения авторов для сферы радиусом $r_{W1} = 4.35$ см (режим 1, 2); *13, 14* — сфера радиусом *r*_{W2} = 5.25 см (режим 1, 2); *15* расчет [33]; 16 — расчеты [26, 10]; 17 — аппроксимация (2) при *f*₂ ≈ 0.573

на, $\eta = 2e\varphi_W / (m_i U_i^2)$ [31]. При $r_W / \lambda_d > 50$ для большой «ненамагниченной» сферы $c_{\Phi x} / c_{0x} \rightarrow$ $\rightarrow 0$ и $c_x \approx c_{0x}$. Для сферы в гиперзвуковом бесстолкновительном потоке $c_{0x} = F_{0x} / (P_d A_W) \approx$ $\approx 2.1...2.3$ [21, 24], где $A_W = \pi r_W^2$ — площадь поперечного сечения сферы, F_{0x} — сила контактного воздействия ионов потока разреженной плазмы на «ненамагниченную» сферу.

Зависимость коэффициента силы сопротивления «намагниченной» сферы при осевой ориентации от отношения магнитного давления поля сферы к скоростному напору потока плазмы P_{BW} / P_d

$$c_{x}(\theta = 0^{\circ}) / c_{0x} =$$

= exp[0.011 \cdot ln² (P_{BW} / P_d)] = f_{1}(P_{BW} / P_d) (1)

приведена на рис. 3 (верхняя кривая): кривая 10 — аппроксимация авторов (1), $c_{0x} \approx 2.15$ — коэффициент силы сопротивления «ненамагниченной» сферы при гиперзвуковом обтекании потоком разреженного газа [24, 21].

Механизм генерирования электромагнитной силы при $U_{\infty} \downarrow \uparrow B_W$ может быть сформулирован по аналогии с [16] следующим образом: магнит с индукцией поля B_W , помещенный в затупленное тело, формирует вокруг сферы неоднородное магнитное поле *B* и кольцевой ток *J*, индуцированный взаимодействием магнитного поля с потоком плазмы. Электромагнитный эффект такого взаимодействия — сила Лоренца $F_L = J \times B$, направленная против потока плазмы. Сила F_L тормозит поток плазмы и генерирует реактивную силу $F_X = -F_L$, действующую на магнит и тормозящую «намагниченное» тело.

Зависимость коэффициента силы сопротивления «намагниченной» сферы при взаимодействии гиперзвукового потока разреженной плазмы с ее собственным магнитным полем от параметра P_{BW} / P_d для ориентации $\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_W$ показана на рис. 3 (нижняя кривая). Аппроксимация авторов (кривая 17)

где

$$c_x / c_{0x} = f_1(P_{BW} / P_d) \cdot f_2$$
, (2)

+ 0.573 sin⁷
$$\theta$$
(|sin θ -|cos θ ||·|sin² θ -|cos^{0.5} θ |))

 $f_2(\theta) \approx \left| \cos^{0.5} \theta \right| +$

$$f_2(\theta = \pi / 2) = 0.573$$
 [31].

Граница мини-магнитосферы ($\theta \approx 80^\circ$, $r_{W1} \approx 4.35$ см рис. 1, *в*) определяется из условия равенства магнитного давления $P_{BL} = (2B_L)^2 / (2\mu)$ и газодинамического давления $P_{dL} = \rho_i U_i^2$ на

границе заторможенного потока плазмы с учетом удвоения индукции поля на магнитопаузе [25, 28], где B_L — индукция магнитного поля на расстоянии L от центра сферы до границы заторможенного потока (магнитопаузы) в экваториальной плоскости при $\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_W$. С учетом того, что $B_I = P_m / (4\pi L^3)$, получаем

$$L = [P_m^2 / (8\pi^2 \mu P_{dL})]^{1/6}.$$

Так как магнитный момент диполя

то

$$L = 2^{1/3} r_W (P_{BW} / P_{dL})^{1/6} = r_W (2P_{BW} / P_d)^{1/6}.$$

 $P_m = 4\pi B_I L^3 = 4\pi B_W r_W^3$,

Режим взаимодействия мини-магнитосферы с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы характеризуют четыре безразмерных параметра [10]: число Маха М; магнитное число Рейнольдса $\operatorname{Re}_{mL} = \mu \sigma U_i L$ для мини-магнитосферы; отношение ларморовского радиуса на границе магнитосферы к характерному размеру магнитосферы $\Delta \approx c / \omega_{ep}$ к характерному размеру магнитосферы Δ / L . С учетом диффузного движения электронов вместо Δ / L используется отношение $\Delta_D / L \approx \operatorname{Re}_{mL}^{-1}$, где $\Delta_D = (c^2 / \omega_{ep}^2)(0.51v_{e\delta} / U_i)$, c — скорость света.

Структура мини-магнитосферы (рис. 1, в) реализована на стенде ИТМ при $L/r_W \approx 4.6$ для $U_i \approx 28.3$ км/с, $N_i \approx 9.6 \cdot 10^{15}$ м⁻³, $M \approx 8.9$, $B_W \approx 40 \text{ мTл}, B_L \approx 2B_W (r_W / L)^3 \approx 1 \text{ мTл}, \Delta \approx$ ≈ 5.7 см, $\Delta_D \approx 4.6$ мм, $L_{iT} \approx 57$ см, $L_{iU} \approx 7$ м, или при M>>1, Re_{mL}>>1, $\Delta / L \approx 0.2 < 1$, $\Delta_D / L =$ $= \operatorname{Re}_{mL}^{-1} \approx 0.02 \le 1$, а также $L_{iU} / L >> 1$, $L_{iT} / L \approx$ ≈ 2.4 , где L_{iT} — ларморовский радиус «тепловых» ионов с энергией $E_i \approx 0.52$ эВ на расстоянии L от центра сферы, L_{iU} — ларморовский радиус ионов набегающего потока с энергией $E_i \approx 1$ ≈ 82 эВ (U_i ≈ 28.3 км/с) на границе магнитосферы; число Кнудсена для ион-ионных соударений $Kn_i = l_{ii} / L \approx 2.6$. Другими словами, на стенде реализован переходный (между МГД и кинетическим) [11] режим взаимодействия мини-магнитосферы с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы. Согласно [11], для такого режима определяющим является «лоренцево» взаимодействие. Режиму взаимодействия на стенде с L_{iII} / L >>1, L_{iT} / L \approx 2.4 при L / r_W от 4.3 до 5.9

Таблица 2. Значения коэффициента сопротивления c_x для «намагниченной» сферы

L/r_W	$c_x(\theta = \pi / 2)$				
	по литературным данным	по аппроксимации (3)			
5.0	3.2 ± 0.4 и 2.9 [26]	3.2 ± 0.4			
5.0	3.813 [33]	3.89 ± 0.25			
5.874	3.4 ± 0.7 [10]	3.2 ± 0.4			

соответствуют измеренные значения коэффициент силы сопротивления «намагниченной» сферы $c_x(\theta = \pi/2)$ от 2.7 до 4.2. В работе [10] для L_{iU}/L от 1 до 100 и $L/r_W \approx 5.0$ получены расчетные значения коэффициента сопротивления $c_x(\theta = \pi/2) \approx 3.4 \pm 0.7$, согласующиеся с измеренными значениями $c_x(\theta = \pi/2)$ на стенде ИТМ. Измеренные значения с погрешностью <7% соответствуют аппроксимации:

$$c_x(\theta = \pi/2)/c_{0x} \approx \xi \exp(0.011 \cdot \ln^2[0.5(L/r_W)^6]),$$
 (3)

где $\xi = 0.573 \pm 0.08$, $P_{BW} / P_d = 0.5(L / r_W)^6$ и $c_{0x} \approx 2.15$ для сферы при $r_W / \lambda_d >> 10$ в бесстолкновительном потоке разреженной плазмы. Значения коэффициента сопротивления «намагниченной» сферы, рассчитанные по аппроксимации (3), и данные [26, 33, 10] приведены в табл. 2. Соответствие результатов вполне удовлетворительное.

ТОРМОЖЕНИЕ «НАМАГНИЧЕННОГО» КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Зависимости коэффициента силы сопротивления c_x , рис. 3 и формулы (1)—(3) могут быть использованы для оценки эффективности применения собственного магнитного поля КА при торможении объектов космического мусора. ОКМ в ионосфере взаимодействует с нейтральными и заряженными частицами потока разреженной плазмы. Для электромагнитной силы общепринятым является выражение $F_x = c_x 0.5 \rho_\infty U_\infty^2 \pi L^2$. Для ионосферы и магнитных полей с индукцией $B_W \ge 0.8$ Тл следует $r_W \ll L$, а $c_\Sigma = c_{0x} + c_x \approx c_x$, так как $c_{0x} \ll c_x$. Тогда для электромагнитной силы, действующей на «намагниченное» тело в ионосферной плазме $F_x = c_x \cdot 0.5 \rho_\infty U_\infty^2 \pi r_W^2$. На рис. 4 приведе-



Рис. 4. Электромагнитная сила F_x , тормозящая «намагниченную» сферу радиусом $r_W = 1.0$ м на высотах 200...1000 км: случай $\mathbf{U}_{\infty} \downarrow \uparrow \mathbf{B}_W$, $\theta = 0$, π : кривая 1 -аппроксимация $c_x = c_{0x} f_1(P_{BW} / P_d)$; кривая 2 -расчет [13]; случай $\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_W$, $\theta = \pi/2$: кривая 3 -аппроксимация авторов $c_x = c_{0x} f_1 f_2$; $4 - c_x \approx 0.5 (P_{BW} / P_d)^{1/3}$



Рис. 5. Зависимость давления электромагнитной силы, действующей на КА, от индукции его собственного магнитного поля, на высоте 700 км: прямая $1 - U_{\infty} \downarrow \uparrow B_W$, $\theta = 0$, р (день, max); $2 - U_{\infty} \perp B_W$, $\theta = \pi/2$ (ночь, min); 3 – пучок ионов Xe⁺ с энергией 3.5 кэВ (КА LEOSWEEP), z = 7 м; 4 – пучок ионов Xe⁺ с энергией 3.5 кэВ (КА LEOSWEEP), z = 10 м; 5 – пучок ионов Xe⁺ с энергией 6 кэВ [19]; z = 20 м; полуугол расходимости пучка 3° ; 6 – пучок ионов Xe⁺ с энергией 6 кэВ [19]; z = 20 м; полуугол расходимости пучка 3° ;

ны значения электромагнитной силы F_x , тормозящей «намагниченную» сферу радиусом $r_W = 1.0$ м с источником собственного магнитного поля $B_W = 0.8$ Тл на высотах 200...1000 км (день, средний уровень солнечной активности). Для ионов плазмы использовались данные [2, 8, 7] и модель IRI-2016.

Кроме аппроксимации (1), при определении коэффициента c_x использовалось решение задачи для «намагниченной» сферы с магнитным диполем в центре [13] при $\mathbf{U}_{\infty} \downarrow \uparrow \mathbf{B}_W$:

$$F_x = 4\pi (\rho_{\infty} U_{\infty}^2 / 2) \cdot (eP_m / (M_i U_{\infty})) \cdot 0.51,$$
и в виде
$$F_x = c_x 0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 \cdot \pi r_W^2,$$

или где

$$c_x = (4\pi \cdot r_W \overline{V_i} / (r_i U_\infty)) = (4\pi \varpi_{iB} r_W / U_\infty).$$

Для случая $U_{\infty} \perp B_W$ ($\theta = \pi / 2$) использовалась аппроксимация

$$c_x \approx 0.5 (P_{BW} / P_d)^{1/3}$$
,
полученная с учётом данных [32]:
 $F_x \approx (P_m / \mu) \cdot (B_L / L)$,

где

$$B_L = (\mu P_d)^{1/2}; \ L = r_W (2P_{BW} / P_d)^{1/6},$$

а также результатов численного решения задачи (см. рис. 10 в работе [27]):

 $F_x = c_x 0.5 \rho_\infty U_\infty^2 \pi L^2, \ c_x \approx 0.5.$

На рис. 5 приведены зависимости давления, создаваемого электромагнитной силой, действующей на «намагниченную» сферу $F_x = c_x(\theta) 0.5 \rho_i U_{\infty}^2$ от индукции В_W собственного магнитного поля тела на высоте 700 км в ионосфере Земли: кривая *1* соответствует ориентации $\mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_{W}$ ($\theta = 0$, день); $2 - \mathbf{U}_{\infty} \perp \mathbf{B}_{W}$ ($\theta = \pi/2$, ночь). На рис. 5 приведены и расчетные значения давления F_{x} на ОКМ ионов Xe⁺ с энергией $E_i \approx 3.5$ кэВ плазменной струи, генерируемой ускорителем, размещенным на специальном KA LEOSWEEP. При расстоянии z = 7 м между ОКМ и КА LEOSWEEP $F_x \approx 8.43$ мH/м² (точка 3), при z = 10 м — $F_x \approx 4.04$ мH/м² (точка 4) [6, 29, 22]. На рис. 5 приведены также расчетные значения давления ионов Xe^+ с энергией $E_i \approx 6$ кэВ плазменной струи с полууглом расходимости пучка $\psi \sim 3^\circ$, создаваемой ускорителем специального КА [19] при подлете к ОКМ по схеме, аналогичной KA LEOSWEEP, на расстояние z = 20 м — $F_{\rm r} \approx 5.78$ мH/м² (точка 5) и $\psi \sim 6^{\circ} - F_{\rm r} \approx$ ≈1.44 мН/м² (точка 6).

При индукции собственного магнитного поля ОКМ $B_W \ge 0.8$ Тл значения давления, создаваемого электромагнитной силой, возникающей при взаимодействии собственного магнитного поля КА с окружающей плазмой, близки к значениям давления ионов Xe⁺ с энергиями $E_i \approx 3.5$ и 6 кэВ при облучении ОКМ с расстояния z = 10 м и z = 20 м при полуугле расходимости пучка $\psi \sim 6^\circ$. Приведенные на рис. 4 и 5 оценки свидетельствуют о том, что собственное магнитное поле ОКМ с индукцией более 0.8 Тл может быть использовано для реализации «пассивной схемы» увода объекта космического мусора на более низкую орбиту в ионосфере Земли.

Идея увода ОКМ на более низкие орбиты с применением дополнительного тормозящего импульса (силы сопротивления) концептуально близка к проектам, предлагающим тормозить ОКМ в атмосфере Земли при воздействии:

а) ионов плазменной струи [6, 29, 19] («активное торможение»);

б) нейтральных частиц атмосферы Земли на дополнительные надувные конструкции КА («пассивное» торможение) [12].

В качестве бортового источника собственного постоянного магнитного поля КА могут использоваться сборки Халбаха [14]. Комплектующими сборок Халбаха служат постоянные неодимовые магниты (цилиндры, кубики) размером от 1 до 2 см и весом от 10 до 18 г. Кубики размером 2 см с индукцией магнитного поля порядка 0.5 Тл в центре и 1 Тл на кромках, сгруппированные по технологии Халбаха, создают одностороннее поле: у лицевой поверхности поле в 1.5...2.0 раза больше, чем у элементных магнитов (0.8...2.0 Тл), с тыльной стороны сборок поле практически отсутствует. Сборки Халбаха изготавливают любой геометрической формы с минимально возможными массогабаритными характеристиками. Две сборки Халбаха, соединенные лицевыми поверхностями, компенсируют поле друг друга. Вне такой системы поле отсутствует. В нужный момент они становятся источником постоянного магнитного поля на борту КА - крепящий зажим удаляется (отстреливается), сборки расталкиваются своими полями и раскрываются. При взаимодействии с окружающей плазмой такое поле генерирует электромагнитную силу, тормозящую КА. По справочным данным индуктивность постоянных неодимовых магнитов уменьшается на 1 % за 100 лет. Система «ионосферная плазма — сборка Халбаха» (из неодимовых магнитов) может генерировать электромагнитную силу, тормозящую КА, сколь угодно долго с момента раскрытия двух сборок. Такой источник силы, тормозящей КА в ионосфере, не потребляет электроэнергию, не требует расхода топлива, рабочего тела и т. п. Это практически «долгоиграющая» сила. Из рис. 4 и 5 следует, что при магнитных полях с индуктивностью 0.8... 2.0 Тл давление, создаваемое электромагнитной силой, генерируемой системой «ионосферная плазма — бортовой магнит», сравнимо с импульсом, инжектируемым плазменными ускорителями специальных КА, предназначенных для реализации процедуры отчистки околоземного пространства от космического мусора [6, 19, 29].

Электромагнитная сила, генерируемая системой «ионосферная плазма — бортовой магнит», может быть использована при реализации схемы «пассивного торможения» для увода объекта космического мусора на более низкую орбиту в ионосфере Земли:

• проектируемые, подготовленные к эксплуатации изделия ракетно-космической техники (потенциальные ОКМ) оснащаются «спящим магнитом» — сборки Халбаха, соединенные лицевыми поверхностями и обеспечивающие допустимый для данного изделия остаточный нескомпенсированный магнитный момент на период эксплуатации его в ионосфере. По истечении срока активной эксплуатации КА зажим, крепящий сборки, удаляется, сборки раскрываются, ионосферная плазма взаимодействует с постоянным магнитным полем на лицевой поверхности сборок. Система «ионосферная плазма — постоянный магнит» генерирует электромагнитную силу, тормозящую ОКМ для перевода его на более низкую орбиту;

• специальный КА с гарпуном (постоянный магнит) при подлете к ОКМ выстрелом «загарпунивает» ОКМ, обеспечивает его собственным магнитным полем. Далее ОКМ с источником собственного магнитного поля, создающим электромагнитную силу, перемещается на более низкую орбиту в автономном режиме без сопровождения его специальным КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для условий физического моделирования получены зависимости коэффициента силы сопротивления КА от параметров, характеризирующих его взаимодействие с гиперзвуковым потоком ионосферной разреженной плазмы: отношения давления собственного магнитного поля КА к скоростному напору набегающего потока и от угла между векторами скорости полета и индукции магнитного поля КА, а также характерного размера мини-магнитосферы к линейному размеру КА.

Показано, что электромагнитная сила сопротивления (торможения) КА, генерируемая при взаимодействии источника собственного магнитного поля (постоянного магнита с индукцией более 0.8 Тл) с ионосферной плазмой на высотах 250...1000 км, сопоставима с импульсом, инжектируемым плазменными ускорителями специальных КА, предназначенных для очистки околоземного пространства от объектов космического мусора путем дополнительного торможения, увода их на более низкие орбиты с последующим сгоранием в плотных слоях атмосферы Земли [15, 20].

Работа выполнялась в рамках проекта «Цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр., напрям Г. Науково-технічна підтримка виконання проектів, включених до Програми спільних досліджень НАН України і ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», п. 14».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Галкин В. С. Определение моментов и сил, действующих на вращающиеся тела в свободномолекулярном потоке и в потоке света. Инженерный журнал. 1965. **5** (5). С. 954—958.
- 2. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. Москва: Наука, 1973. 272 с.
- 3. Подгорный И. М., Сагдеев Р. 3. Физика межпланетной плазмы и лабораторные эксперименты. *Успехи физ. наук.* 1969. **98** (3). С. 409—440.
- 4. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. Киев: Наук. думка, 1995. 180 с.
- 5. Bityurin V. A., Vatazhin A. B., Gus'kov O. V., Kopchenov V. I. Hypersonic flow past the spherical nose of a body in the presence of a magnetic field. *Fluid Dynamics*. 2004. **39** (4). P. 657–666.
- 6. Bombardelli C., Peláez J. Ion beam shepherd for contactless space debris removal. *J. Guidance and Dynamics*. 2011. **34** (3). P. 916–920.
- 7. Draft International Standard. Space environment (natural and artificial) Earth upper atmosphere. ISO 14222:2013(E).
- 8. ECSS-E-10-04 A. Space engineering: Space environment. Noordwijk: ESA Publications Division, 2000. 2000-01-21. 196 p.
- 9. Fujino T., Shimosowa Y. Numerical study of magnetohydrodynamic flow control along superorbital reentry trajectories. *J. Spacecraft and Rockets*. 2016. **53** (3). P. 528–537.
- 10. Fujita K. Particle simulation of moderately-sized magnetic sail. J. Space Technology Science. 2004. 20 (2). P. 26-31.
- Funaki I., Kojima H., Yamakawa Y. Laboratory experiment of plasma flow around magnetic sail. *Astrophys. Space Sci.* 2007. 307 (1-3). P. 63–68.
- 12. Grossman G., Williams G. Inflatable concentrators for solar propulsion and dynamic space power. J. Solar Energy Engineering. 1990. **112** (11). P. 229–236.
- 13. Gunko J. F., Kurbatova G. I., Filippov B. V. Methodic of calculation aerodynamic coefficients for bodies with magnetic fields in rarefied plasma. *Rarefied gas aerodynamic*. 1973. No. 6. P. 54–66.
- 14. Halbach K. Application of permanent magnet in accelerators and electron storage ring. J. Applied Phys. 1985. 57. P. 3605–3608.
- 15. Inamori T., Kawashima R., Saisutjarit P., Sako N., et. al. Magnetic plasma deorbit system for nano-and micro-satellites using magnetic torquer interference with space plasma in low Earth orbit. *Acta Astronautica*. 2015. **112**. P. 192–199.
- Katsurayama H., Kawamura M., Matsuda A., Abe T. Kinetic and continuum simulation of electromagnetic control of a simulated reentry flow. J. Spacecraft and Rockets. 2008. 45 (2). P. 248–254.
- 17. Kawamura H., Matsuda A., Katsurayama H., Otsu H., et. al. Experiment on drag enhancement for a blunt body with electrodynamics heat shield. *J. Spacecraft and Rockets*. 2009. **46** (6). P. 1171–1177.

- Kawashima R., Bak J., Matsurawa S., Inamori T. Particle simulation of plasma drag force generation in the magnetic plasma deorbit. J. Spacecraft and Rockets. 2018. 55 (5). P. 1074–1082.
- Kitamura S., Hayakawa Y., Kawamoto S. A reorbiter for GEO large debris objects using ion beam irradiation. Acta Astronautica. 2014. 94 (2). P. 725–735.
- 20. Mark C. P., Kamath S. Review of active space debris removal methods. Space Policy. 2019. 47. P. 194-206.
- Mehta P. M., Walker A., McLaughlin C. A., Koller J. Comparing physical drag coefficients computed using different gassurface interaction models. J. Spacecraft and Rockets. 2014. 51 (3). P. 873–883.
- 22. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C., Urrutxua H., et. al. Hypersonic plasma plume expansion in space. *Proc. IEPC* (Intern. Electric Propulsion Conf.). 2011. 086.
- 23. Mitchner M., Kruger Ch. Partially ionized gases. New York: Wiley, 1973. 518 p.
- 24. Moe K., Moe M. M., Wallace S. D. Improved satellite drag coefficient calculation from orbital measurements of energy accommodation. *J. Spacecraft and Rockets*. 1998. **35** (3). P. 266–272.
- 25. Nishida A. Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. New-York Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 1978. 256 p.
- Nishida H., Funaki I. Analysis of thrust characteristics of a magnetic sail in magnetized solar wind. J. Propulsion and Power. 2012. 28 (3). P. 636–641.
- 27. Nishida H., Ogawa H., Funaki I., Fujita K., Yamakawa H. Two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of a magnetic sail. J. Spacecraft and Rockets. 2006. 43 (3). P. 667–672.
- 28. Parks D. E., Katz I. Asymptotic magnetic field expansion in mini-magnetospheric plasma propulsion. J. Spacecraft and Rockets. 2003. 40 (4). P. 597–598.
- 29. Shuvalov V. A., Gorev N. A., Tokmak N. A., Kochubei G. S. Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object. *Acta Astrnautica*. 2017. **132.** P. 97–102.
- Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Lazuchenkov D. N., Kochubey G. S. Probe diagnostics of laboratory and ionospheric rarefied plasma flows. *Instruments and experimental techniques*. 2013. 56 (4). P. 459–467.
- 31. Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S. Control of the drag on a spacecraft in the earth's ionosphere using the spacecraft's magnetic field. *Acta Astronautica*. 2018. **151**. P. 717–725.
- Toivanen P. K., Janhunen P., Koskinen H. E. J. Magnetospheric propulsion (eMPii). *ESTEC/Contractor N16361/02/NL/LvH*. Final report. 2004. No. 1.3. 78 p.
- 33. Zubrin P. M. Andrews D. G. Magnetic sail and interplanetary travel. J. Spacecraft and Rockets. 1991. 28 (2). P. 197-203.

Стаття надійшла до редакції 08.06.2019

REFERENCES

- 1. Galkin V. S. (1965). Opredelenie momentov i sil, deyctvuyushih na vrashaushiesiy tela v svobodnomolecularnom potoke i v potoke sveta. *Inzhenerny zhurnal*, **5** (5), 954–958 [in Russian].
- 2. Gurevich A. V., Shvartsburg A. B. (1973). Nunlinear theory of radio wave propagation in the ionosphere. Moscow: Nauka.
- 3. Podgorny I. M., Sagdeev R. Z. (1970). Physics of interplanetary plasma and laboratory experiments. *Sov. Phys. Uspekhi*, **12**, 445–462 [in Russian].
- 4. Shuvalov V. A. (1995). Modelling of the interaction the bodies with the ionosphere. Kuiv: Naukova dumka [in Russian].
- 5. Bityurin V. A., Vatazhin A. B., Gus'kov O. V., Kopchenov V. I. (2004). Hypersonic flow past the spherical nose of a body in the presence of a magnetic field. *Fluid Dynamics*, **39** (4), 657–666.
- 6. Bombardelli C., Peláez J. (2011). Ion beam shepherd for contactless space debris removal. *J. Guidance and Dynamics*, **34** (3), 916–920.
- 7. Draft International Standard. Space environment (natural and artificial) Earth upper atmosphere. ISO 14222:2013(E).
- 8. ECSS-E-10-04 A. (2000). Space engineering: Space environment. 2000-01-21. Noordwijk: ESA Publications Division, 196.
- Fujino T., Shimosowa Y. (2016). Numerical study of magnetohydrodynamic flow control along superorbital reentry trajectories. J. Spacecraft and Rockets, 53 (3), 528–537.
- 10. Fujita K. (2004). Particle simulation of moderately sized magnetic sail. J. Space Technology Science, 20 (2), 26–31.
- Funaki I., Kojima H., Yamakawa Y. (2007). Laboratory experiment of plasma flow around magnetic sail. *Astrophys. Space Sci.*, 307 (1-3), 63–68.
- Grossman G., Williams G. (1990). Inflatable concentrators for solar propulsion and dynamic space power. J. Solar Energy Engineering, 112 (11), 229–236.
- Gunko J. F., Kurbatova G. I., Filippov B. V. (1973). Methodic of calculation aerodynamic coefficients for bodies with magnetic fields in rarefied plasma. *Rarefied gas aerodynamic*, No. 6, 54–66.
- 14. Halbach K. (1985). Application of permanent magnet in accelerators and electron storage ring. J. Applied Phys., 57, 3605–3608.

- 15. Inamori T., Kawashima R., Saisutjarit P., Sako N., et. al. (2015). Magnetic plasma deorbit system for nano-and microsatellites using magnetic torquer interference with space plasma in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, **112**, 192–199.
- Katsurayama H., Kawamura M., Matsuda A., Abe T. (2008). Kinetic and continuum simulation of electromagnetic control of a simulated reentry flow. J. Spacecraft and Rockets, 45 (2), 248–254.
- 17. Kawamura H., Matsuda A., Katsurayama H., Otsu H., et. al. (2009). Experiment on drag enhancement for a blunt body with electrodynamics heat shield. *J. Spacecraft and Rockets*, **46** (6), 1171–1177.
- 18. Kawashima R., Bak J., Matsurawa S., Inamori T. (2018). Particle simulation of plasma drag force generation in the magnetic plasma deorbit. *J. Spacecraft and Rockets*, **55** (5), 1074–1082.
- 19. Kitamura S., Hayakawa Y., Kawamoto S. (2014). A reorbiter for GEO large debris objects using ion beam irradiation. *Acta Astronautica*, **94** (2), 725–735.
- 20. Mark C. P., Kamath S. (2019). Review of active space debris removal methods. Space Policy, 47, 194-206.
- 21. Mehta P. M., Walker A., McLaughlin C. A., Koller J. (2014). Comparing physical drag coefficients computed using different gas-surface interaction models. *J. Spacecraft and Rockets*, **51** (3), 873–883.
- 22. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C., Urrutxua H., et. al. (2011). Hypersonic plasma plume expansion in space. *Proc. IEPC* (Intern. Electric Propulsion Conf.), 086.
- 23. Mitchner M., Kruger Ch. (1973). Partially ionized gases. New York: Wiley.
- 24. Moe K., Moe M. M., Wallace S. D. (1998). Improved satellite drag coefficient calculation from orbital measurements of energy accommodation. *J. Spacecraft and Rockets*, **35**(3), 266–272.
- 25. Nishida A. (1978). Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. New-York Heidelberg Berlin: Springer-Verlag.
- 26. Nishida H., Funaki I. (2012). Analysis of thrust characteristics of a magnetic sail in magnetized solar wind. *J. Propulsion and Power*, **28**(3), 636–641.
- 27. Nishida H., Ogawa H., Funaki I., Fujita K., Yamakawa H. (2006). Two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of a magnetic sail. *J. Spacecraft and Rockets*, **43** (3), 667–672.
- 28. Parks D. E., Katz I. (2003). Asymptotic magnetic field expantion in mini-magnetospheric plasma propulsion. J. Spacecraft and Rockets, 40 (4), 597–598.
- 29. Shuvalov V. A., Gorev N. A., Tokmak N. A., Kochubei G. S. (2017). Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object. *Acta Astrnautica*, **132**, 97–102.
- 30. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Lazuchenkov D. N., Kochubey G. S. (2013). Probe diagnostics of laboratory and ionospheric rarefied plasma flows. *Instruments and experimental techniques*, **56** (4), 459–467.
- 31. Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S. (2018). Control of the drag on a spacecraft in the Earth's ionosphere using the spacecraft's magnetic field. *Acta Astronautica*, **151**, 717–725.
- 32. Toivanen P. K., Janhunen P., Koskinen H. E. J. (2004). Magnetospheric propulsion (eMPii). *ESTEC/Contractor N16361/02/ NL/LvH*. Final report, **1.3**. 78 p.
- 33. Zubrin P. M., Andrews D. G. (1991). Magnetic sail and interplanetary travel. J. Spacecraft and Rockets, 28 (2), 197–203.

Received 08.06.2019

В. О. Шувалов¹, зав. відділу, д-р техн. наук, проф.

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки та премії НАН України ім. М. К. Янгеля

E-mail: vashuvalov@ukr.net

*В. Г. Сіманов*², пров. конструктор

П. Г. Хорольський², пров. наук. співроб., канд. техн. наук

С. М. Кулагін¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

¹ Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України

вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

²ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»

вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

ПРО ГАЛЬМУВАННЯ ШТУЧНО «НАМАГНІЧЕНОГО» КОСМІЧНОГО АПАРАТА У ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ

За результатами фізичного (стендового) моделювання динамічної взаємодії «намагніченого» тіла з гіперзвуковим потоком розрідженої плазми в іоносфері Землі отримано залежності коефіцієнта сили опору від відношення магнітного тиску до швидкісного напору, від кута між векторами швидкості потоку плазми (польоту КА) і індукції власного магнітного поля, а також відношення характерного розміру збуреної зони при обтіканні «намагніченого» тіла до його лінійного розміру. Визначено залежність електромагнітної сили, яка гальмує КА на висоті 700 км, від індукції його власного магнітного поля. Для діапазону висот 250...1000 км в іоносфері Землі показано, що електромагнітна сила, яку генерує взаємодія власного магнітного поля КА (≥0.8 Тл) з навколишньою плазмою, порівнянна з імпульсом, який інжектують плазмові прискорювачі спеціальних космічних апаратів. Ці апарати призначено для примусового «активного» очищення навколоземного простору від об'єктів космічного сміття з лінійним розміром понад 0.5 м (паливних баків, останніх ступенів ракет-носіїв, обтічників, КА, що вичерпали ресурс тощо). Процедура очищення передбачає гальмування об'єктів космічного сміття плазмовим струменем, відведення їх на нижчі орбіти і наступну утилізацію при згорянні у щільних шарах атмосфери Землі. При індукції власного магнітного поля КА більше 0.8 Тл електромагнітна сила більш ніж на три порядки перевищує силу гальмування КА, обумовлену дією нейтрального компонента частково іонізованої іоносферної плазми на висотах понад 700 км. Застосування електромагнітної сили, яку генерує система «намагнічений КА — іоносферна плазма» може стати альтернативою технологіям «активного» (плазмові струмені спеціальних КА) і «пасивного» (надувні конструкції КА) очищення навколоземного простору від об'єктів космічного сміття на висотах 250...1000 км.

Ключові слова: космічний апарат, іоносферна плазма, магнітне поле, електромагнітна сила, гальмування, космічне сміття.

*V. A. Shuvalov*¹, Head of Department, Dr.Sci. in Engineering, Professor Laureate of the State Prize in Science and Technology and M.K. Yangel Prize of NAS of Ukraine E-mail: vashuvalov@ukr.net *V. G. Simanov*², Chief Designer *P. G. Horolsky*², Chief Researcher, Cand. Sci. in Engineering *S. N. Kulagin*¹, Senior Researcher, Cand. Sci. in Engineering
¹ Institute of technical mechanics of the NAS of Ukraine and SSA of Ukraine
15, Leshko-Popel Str., Dnipro, 49005 Ukraine
² Yuzhnoye State Design Office
3, Kryvorizska Str., Dnipro, 49008 Ukraine
DECELERATION OF AN ARTIFICIALLY MAGNETIZED

SPACECRAFT IN THE IONOSPHERIC PLASMA

The physical modeling of the dynamic interaction of a "magnetized" body with a hypersonic rarefied plasma flow in the Earth's ionosphere gives the dependences of the drag force on the ratio of magnetic pressure to the velocity head, on the angle between vectors of the plasma flow velocity (spacecraft flight) and induction of own magnetic field, as well as on the ratio of the characteristic size of a disturbed zone in the flow around the "magnetized" body to its linear size. The dependence of the electromagnetic force braking a spacecraft at an altitude of ~ 700 km on the induction of its magnetic field is determined. For the altitude range of 250...1000 km in the Earth's ionosphere, it is shown that the electromagnetic force generated by the interaction of the spacecraft's magnetic field (induction ≥ 0.8 T) with the surrounding plasma is comparable to an impulse injected by the plasma jet of the special spacecraft. Such vehicles are intended for forced "active" cleaning of near-Earth space from large space debris objects with a linear size of ≥ 0.5 m (fuel tanks, last stages of launch vehicles, cowls, used spacecraft, etc.). The cleaning procedure involves braking of space debris objects with a plasma jet, shifting them to lower orbits, and then removing by combustion in dense layers of the Earth's atmosphere. With the induction of spacecraft's magnetic field of higher than 0.8 T, the electromagnetic force significantly, by more than three orders of magnitude, exceeds the deceleration force. The latter is due to the action of the neutral component of the partially ionized ionospheric plasma at altitudes \geq 700 km. The use of electromagnetic force generated in the system "magnetized spacecraft - ionospheric plasma" can be an alternative to the technologies of "active" (plasma jets of special spacecraft) and "passive" (inflatable spacecraft constructions) cleaning of near-earth space from the space debris objects at altitudes of 250...1000 km.

Keywords: spacecraft, ionospheric plasma, magnetic field, electromagnetic force, braking, space debris.

https://doi.org/10.15407/knit2020.02.072 УДК 550.374, 550.386

Л. Ф. ЧЕРНОГОР

д-р физ.-мат. наук, проф. E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua **H. Б. ШЕВЕЛЕВ** аспирант, мл. науч. сотруд.

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022

ШИРОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕЧЕНИЕ СИЛЬНЕЙШЕЙ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 7—9 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Сентябрь 2017г., несмотря на близость к минимуму в 24-м цикле солнечной активности, характеризовался высокой активностью светила. Произошло 40 вспышек класса С, 15 — класса М и 4 — класса Х. Отмечались мощные выбросы корональной массы и сильные геокосмические бури, представляющие собой совокупность магнитных, ионосферных, атмосферных и электрических бурь. Цель работы — изложение результатов анализа глобальных квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение уникальной геокосмической бури 7—9 сентября 2017 г. Для анализа временных вариаций привлекались данные сети магнитометров «Intermagnet» на станииях Tamanrasset (22.79°N, 5.53°E), Duronia (41.35°N, 14.466°E), Lonjsko Polje (45.408°N, 16.659°E), Belsk (51.84°N, 20.79°E), Uppsala (59.903°N, 17.353°E), Abisko (68.358°N, 18.823°E) c разрешением около 0.1 нТл и временной дискретизацией в 1 мин. Анализировались суточные вариации горизонтальных компонент поля за 7—9 сентября 2017 г. Полосовая фильтрация и системный спектральный анализ выполнены в диапазоне периодов 2...120 мин. При этом одновременно использовались взаимодополняющие друг друга оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование на основе базисной функции Морле. Изучена широтная зависимость квазипериодических возмущений горизонтальных компонент геомагнитного поля в течение уникальной геокосмической бури и в контрольные сутки. Определены амплитуда, спектральный состав и длительность возмущений. Продемонстрировано, что геокосмическая буря сопровождалась как апериодическими, так и квазипериодическими возмущениями геомагнитного поля. Квазипериодические вариации имели место в диапазоне периодов 35...55 и 70...110 мин. Квазипериодичность усиливалась по мере уменьшения географической широты магнитной станции. При увеличении географической широты от 20 до 70° амплитуда возмущений увеличивалась от 20 до 1500 нТл. Продолжительность цугов колебаний 8—9 сентября 2017 г. составляла от нескольких часов до 16 ч.

Ключевые слова: магнитная буря, широтная зависимость вариаций геомагнитного поля, апериодические и квазипериодические возмущения, системный спектральный анализ, параметры квазипериодических возмущений.

введение

Сентябрь 2017 г., несмотря на близость к минимуму в 24-м цикле солнечной активности, характеризовался высокой активностью светила. Произошло 40 вспышек класса С, 15 — класса М и 4 — класса Х. Отмечались мощные выбросы корональной массы и сильные геокосмические бури, представляющие собой совокупность магнитных, ионосферных, атмосферных и элек-

Цитування: Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Широтная зависимость квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7—9 сентября 2017 года. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3 (123). С. 72—83. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.072


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра в период 4—10 сентября 2017 г.: измеренные концентрации частиц n_{sw} , температуры T_{sw} , радиальной скорости V_{sw} (по данным сайта ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/) и рассчитанного динамического давления p_{sw} , измеренных компонентов B_z и B_y межпланетного магнитного поля (по данным спутника ACE); рассчитанных значений энергии ε_A , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени; *AE*-индекса, K_p -индекса и D_{st} -индекса (по данным сайта http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/)



трических бурь [4]. Отдельным проявлениям геокосмических бурь 6–10 сентября 2017 г. посвящен ряд работ. В работе [12] кратко описаны процессы на Солнце, в межпланетной среде и на Земле в течение 2—15 сентября 2017 г. В работах [2, 7, 9, 10, 13] описаны проявления магнитных бурь, в работах [11, 14] — проявления ионосферных бурь в высоких, низких и экваториальных широтах, в работах [8, 15] — проявления атмосферных бурь. В работе [6] описана динамика плазменных пузырей над Китаем в течение магнитной бури 8 сентября 2017 г. В работе [5] дан краткий анализ особенностей магнитной бури 7—9 сентября 2017 г.

Цель работы — изложение результатов анализа глобальных квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение уникальной геокосмической бури 7—9 сентября 2017 г.

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Наиболее мощные солнечные вспышки в активной области Солнца AR2673 имели место в 09:10 UT (X2.2) и 12:02 UT (X9.3) 6 сентября 2017 г., а также в 16:47 UT (X8.2) 10 сентября 2017 г. Заметим, что вспышки класса X9.3 и X8.2 были самыми сильными в 24-м шикле солнечной активности. 7 сентября концентрация частиц в солнечном ветре увеличилась примерно от $(2-3) \cdot 10^6$ до 10^7 м⁻³, их скорость — от 500 до 800 км/с, температура — от 10⁵ до 12 · 10⁵ К (рис. 1). Значения В_-компонента межпланетного магнитного поля 7 и 8 сентября 2017 г. достигали -10 и -12 нТл соответственно. Продолжительности отрицательных значений В, равнялись 12 и 18 ч соответственно. Значения функции Акасофу достигали 15 и 50 ГДж/с 7 и 8 сентября соответственно. 7 сентября значения индекса АЕ увеличивались до 1500...2000 нТл. Минимальные значения индекса D_{st} , равные -144 и -111 нТл, отмечались 8 сентября 2017 г. в 01:05 UT и 15:05 UT соответственно. В обоих случаях максимальные значения индекса К_п составляли 8. В течение 7—8 сентября 2017 г. наблюдались две магнитные бури.

Добавим, что магнитная буря 8 сентября 2017 г. класса G4 (индекс $A_p = 106$) была второй по интенсивности после самой сильной бури 17 марта 2015 г. (индекс $A_p = 108$). Для бури 8 сентября 2017 г. $\Sigma K_p = 48$, а для бури 17 марта 2015 г. — $\Sigma K_p = 49$.



Рис. 2. Волновые формы вариаций горизонтальных компонентов геомагнитного поля 7 (*a*), 8 (δ) и 9 (ϵ) (слева — *X*-компонент, справа — *Y*-компонент) на станциях: Abisko, Uppsala, Belsk, Lonjsko Polje, Duronia, Tamanrasset (панели сверху вниз)



Puc. 3. Результаты ССА временны́х вариаций геомагнитного поля 8 сентября 2017 г. для станции Abisko. Панели сверху вниз: исходные волновые формы, результаты оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле. Справа показаны энергограммы (распределение энергий по периодам)

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для анализа временных вариаций привлекались данные сети магнитометров «Intermagnet» на станциях Tamanrasset (22.79°N, 5.53°E), Duronia (41.35°N, 14.466°E), Lonjsko Polje (45.408°N, 16.659°E), Belsk (51.84°N, 20.79°E), Uppsala (59.903°N, 17.353°E), Abisko (68.358°N, 18.823°E) с разрешением около 0.1 нТл и временной дискретизацией в 1 мин. Анализировались суточные вариации горизонтальных компонентов поля за 7—9 сентября 2017 г. Полосовая фильтрация и системный спектральный анализ (ССА) выполнены в диапазоне периодов 2...120 мин. При этом одновременно использовались взаимодополняющие друг друга оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) на основе базисной функции Морле [3]. Оконное преобразование Фурье обладает лучшим временны́м разрешением, АПФ — лучшим разрешением по периодам. Вейвлет-преобразование, как известно, является математическим микроскопом [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Возмущения геомагнитного поля наблюдались в интервалах времени с 20:00 7 сентября до 04:00 8 сентября 2017 г. и с 12:00 8 сентября до



Рис. 4. То же для станции Uppsala

08:00 9 сентября 2017 г. (рис. 2). Как и следовало ожидать, по мере уменьшения широты уровень флуктуаций геомагнитного поля уменьшался примерно от 800...1500 до 20...40 нТл. В высоких широтах вариации уровня были скорее апериодическими, а в средних и низких широтах они были как апериодическими, так и квазипериодическими с периодом от 30 до 100 мин (рис. 3—8).

Рассмотрим подробнее результаты ССА временны́х вариаций Х- и Ү-компонентов геомагнитного поля 8 сентября 2017 г., зарегистрированных различными станциями сети «Intermagnet».

На высокоширотной станции Abisko вариации геомагнитного поля были скорее апериодическими (см. рис. 3). В вариациях Х-компонента выделялись периоды *T*, близкие к 15...23 и 70... 90 мин, в вариациях Y-компонента — 15...23, 35...50 и 65...100 мин.

Вариации геомагнитного поля на станции Uppsala, которая находится между высокими и средними широтами, также скорее были апериодическими (см. рис. 4). Для X- и Y-компонентов наибольшую амплитуду имели составляющие с периодом $T \approx 75...105$ мин, несколько меньшую — составляющие с периодом $T \approx 35...$ 45 мин.

На среднеширотной станции Belsk квазипериодичность вариаций геомагнитного поля заметно выражена (см. рис. 5). Наибольшую энергию имели составляющие $T \approx 40...80$ мин для X-компонента и $T \approx 60...120$ мин для Y-компонента.



Рис. 6. То же для станции Lonjsko Polje

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2



Рис. 7. То же для станции Duronia



Рис. 8. То же для станции Tamanrasset

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

Квазипериодичность вариаций геомагнитного поля на среднеширотной станции Lonjsko Polje была выражена четче, чем на предыдущих трех станциях (см. рис. 6). В спектре колебаний преобладали периоды $T \approx 70...110$ мин и $T \approx 40...60$ мин.

Вариации геомагнитного поля на среднеширотной станции Duronia были практически квазипериодическими (см. рис. 7). В спектре преобладали составляющие $T \approx 75...105$ мин, а также $T \approx 35...55$ мин.

На низкоширотной станции Tamanrasset квазипериодичность вариаций геомагнитного поля выражена отчётливо (см. рис. 8). Наибольшую амплитуду имели составляющие с периодами $T \approx 80...110$ мин для X-компонента и $T \approx 70...$ 110 мин для Y-компонента.

Продолжительность квазипериодических вариаций геомагнитного поля в ночь с 7 на 8 сентября 2017 г. на всех станциях составляла около 4 ч, а в течение дня 8 сентября и ночи с 8 на 9 сентября 2017 г. продолжительность достигала 16 ч (см. рис. 2).

обсуждение

В работе представлены волновые формы вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7-9 сентября 2017 г. Магнитная буря класса G4 по своей интенсивности уступала лишь магнитной буре 17 марта 2015 г., которая была самой сильной в 24-м цикле солнечной активности. Магнитная буря сопровождалась сильными вариациями компонентов геомагнитного поля. На высокоширотной станции Abisko апериодические вариации достигали 1500 нТл для Х-компонента и 1000 нТл для У-компонента. Для станции Uppsala, размещённой на широте примерно 60°N, апериодические всплески не превышали 400 и 300 нТл для Х- и Ү-компонентов соответственно. На трех среднеширотных станциях уровень флуктуаций для этих же компонентов не превышал 50...100 нТл. На низкоширотной станции Tamanrasset вариации геомагнитного поля не превышали 20...40 нТл.

Заметим, что с уменьшением географической широты вариации геомагнитного поля становились более упорядоченными: от апериодических в высоких широтах до квазипериодических в средних и низких широтах.

Как и следовало ожидать, вариации X- и Y-компонентов следовали за уменьшением D_{st} -индекса и увеличением K_p -идекса. Продолжительность магнитной бури, наблюдавшейся в ночь с 7 на 8 сентября 2017 г., не превышала 4 ч, а продолжительность бури 8—9 сентября 2017 г. достигала 16 ч.

В спектре вариаций геомагнитного поля преобладали составляющие с периодом 70...110 мин. Заметно меньшую энергию имели гармоники с периодом $T \approx 35...55$ мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Геокосмическая буря сопровождалась как апериодическими, так и квазипериодическими возмущениями геомагнитного поля. Квазипериодические вариации имели место в диапазоне периодов 35...55 и 70...110 мин.

2. Квазипериодичность усиливалась по мере уменьшения географической широты магнитной станции.

3. При увеличении географической широты от 20 до 70° амплитуда возмущений увеличивалась от 20 до 1500 нТл.

4. Продолжительность цугов колебаний 8—9 сентября 2017 г. составляла от нескольких часов до 16 ч.

Авторы благодарны за возможность использования данных обсерваторий Tamanrasset, Duronia, Lonjsko Polje, Belsk, Uppsala, Abisko. Мы выражаем благодарность национальным институтам и INTERMAGNET (www.intermagnet.org), которые поддерживают высокие стандарты магнитных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физ. наук.* 1996. **166**. С. 1145—1170.
- Пилипенко В. А., Белаховский В. Б., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. Воздействие магнитной бури 7—8 сентября 2017 года на электроэнергетическую систему. *Тр. Кольского науч. центра РАН. Гелиогеофизика.* 2018. Вып. 4. С. 29—35.
- 3. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. **48**, № 5. С. 681—702.
- 4. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь:* Монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, Ин-т ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
- 5. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Квазипериодические вариации геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 6—10 сентября 2017 года: глобальные характеристики. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XVI Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 16—21 сентября 2019 г.
- 6. Aa E. Midlatitude Plasma Bubbles Over China and Adjacent Areas During a Magnetic Storm on 8 September 2017. *Space Weather*. 2018. **16**, № 3. P. 321–331.
- 7. Gromova L. I., Kleimenova N. G., Gromov S. V. *High-latitude daytime magnetic bays in the September 2017 strong magnetic storm*. Proc. XLI Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena». Apatity, 2018. P. 14–17.
- 8. Kilifarska N., Tassev Y. Ozone profile response to the series of coronal mass ejections and severe geomagnetic storm in September 2017. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*. 2018. **71**, № 5. P. 662–668.
- 9. Lei J., Huang F., Chen X., Zhong J., Ren D., Wang W., Yue X., Luan X., Jia M., Dou X., Hu L., Ning B., Owolabi C., Chen J., Li G., Xue X. Was Magnetic Storm the Only Driver of the Long-Duration Enhancements of Daytime Total Electron Content in the Asian-Australian Sector Between 7 and 12 September 2017? *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2018. **123**, № 4. P. 3217–3232.
- Sidorov R., Soloviev A., Gvishiani A., Getmanov V., Mandea M., Petrukhin A., Yashin I. A combined analysis of geomagnetic data and cosmic ray secondaries in the September 2017 space weather phenomena studies. *Ann. Geophys.* URL: https://doi. org/10.5194/angeo-2018-111 (дата звернення 18.07.2019).
- 11. Sripathi S., Ram Singh. Response of the equatorial and low latitude ionosphere to September 2017 solar flares and their likely role in storm-time electrodynamics. 2019 URSI Asia Pacific Radio Science Conference. Mo-GO1-6.
- 12. Tassev Y., Velinov P. I. Y., Tomova D., Mateev L. Analysis of extreme solar activity in early September 2017: G4 severe geomagnetic storm (07–08.09) and GLE72 (10.09) in solar minimum. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences: sciences mathématiques et naturelles.* 2017. **70**, № 10. 1437–1444.
- Tomova D., Velinov P., Tassev Y. Comparison between extreme solar activity during periods March 15–17, 2015 and September 4–10, 2017 at different phases of solar cycle 24. *Aerospace Research in Bulgaria*. 2017. 29. P. 10–28.
- Yamauchi M., Sergienko T., Enell C. F., Schillings A., Slapak R., Johnsen M. G., Tjulin A., Nilsson H. Ionospheric Response Observed by EISCAT During the 6–8 September 2017 Space Weather Event: Overview. *Space Weather*. 2018. 16, № 9. P. 1437–1450.
- Yuan L., Jin S., Calabia A. Distinct thermospheric mass density variations following the September 2017 geomagnetic storm from GRACE and Swarm. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. 184. P. 30—36.

Стаття надійшла до редакції 18.07.2019

REFERENCES

- 1. Astaf'eva N. M. (1996). Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Phys. Usp.*, **39**, 1085–1108.
- Pilipenko V. A., Belakhovskiy V. B., Sakharov Ya. A., Selivanov V. N. (2018). Magnetic storm on September 7–8, 2017 influence on electroenergetic system. *RAS Kol'sk Scientific Centre Proceedings. Geliogeophysics*, 4, 29–35 [in Russian].
- 3. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48** (5), 652–673.
- 4. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geocosmic storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
- Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2019). Geomagnetic Field Quasi-Periodic Variations During Severe Geospace Storm of September 6–10, 2017: Global Characteristics. *Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics "Physical Processes in Outer and Near-Earth Space". XVI Young Scientists' Conference "Interaction of fields and radiation with matter".* Irkutsk, 16–21 September 2019.

- 6. Aa E. (2018). Midlatitude Plasma Bubbles Over China and Adjacent Areas During a Magnetic Storm on 8 September 2017. *Space Weather*, **16**, № 3, 321–331.
- 7. Gromova L. I., Kleimenova N. G., Gromov S. V. (2018). *High-latitude daytime magnetic bays in the September 2017 strong magnetic storm*. Proc. XLI Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 14–17.
- 8. Kilifarska N., Tassev Y. (2018). Ozone profile response to the series of coronal mass ejections and severe geomagnetic storm in September 2017. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, **71**, № 5, 662–668.
- 9. Lei J., Huang F., Chen X., Zhong J., Ren D., Wang W., Yue X., Luan X., Jia M., Dou X., Hu L., Ning B., Owolabi C., Chen J., Li G., Xue X. (2018). Was Magnetic Storm the Only Driver of the Long-Duration Enhancements of Daytime Total Electron Content in the Asian-Australian Sector Between 7 and 12 September 2017? *J. Geophys. Res.: Space Physics*, **123**, № 4, 3217–3232.
- Sidorov R., Soloviev A., Gvishiani A., Getmanov V., Mandea M., Petrukhin A., Yashin I. (2018). A combined analysis of geomagnetic data and cosmic ray secondaries in the September 2017 space weather phenomena studies. *Ann. Geophys.* URL: https://doi.org/10.5194/angeo-2018-111 (Last accessed 18.07.2019).
- 11. Sripathi S., Ram Singh. (2019). Response of the equatorial and low latitude ionosphere to September 2017 solar flares and their likely role in storm-time electrodynamics. 2019 URSI Asia Pacific Radio Science Conference. Mo-GO1-6.
- 12. Tassev Y., Velinov P. I. Y., Tomova D., Mateev L. (2017). Analysis of extreme solar activity in early September 2017: G4 severe geomagnetic storm (07–08.09) and GLE72 (10.09) in solar minimum. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences: sciences mathématiques et naturelles*, **70**, № 10, 1437–1444.
- 13. Tomova D., Velinov P., Tassev Y. (2017). Comparison between extreme solar activity during periods March 15 17, 2015 and September 4–10, 2017 at different phases of solar cycle 24. *Aerospace Research in Bulgaria*, **29**, 10–28.
- 14. Yamauchi M., Sergienko T., Enell C. F., Schillings A., Slapak R., Johnsen M. G., Tjulin A., Nilsson H. (2018). Ionospheric Response Observed by EISCAT During the 6–8 September 2017 Space Weather Event: Overview. *Space Weather*, **16**, № 9, 1437–1450.
- 15. Yuan L., Jin S., Calabia A. (2019). Distinct thermospheric mass density variations following the September 2017 geomagnetic storm from GRACE and Swarm. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **184**, 30–36.

Received 18.07.2019

Л. Ф. Чорногор д-р фіз.-мат. наук, проф. E-mail: Leonid. F.Chernogor@univer.kharkov.ua *М. Б. Шевелев* аспірант, мол. наук. співроб.

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ШИРОТНА ЗАЛЕЖНІСТЬ КВАЗІПЕРІОДИЧНИХ ВАРІАЦІЙ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОТЯГОМ СИЛЬНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 7—9 ВЕРЕСНЯ 2017 РОКУ

Вересень 2017 р., незважаючи на близькість до мінімуму в 24-му циклі сонячної активності, характеризувався високою активністю світила. Сталося 40 спалахів класу С, 15 — класу М і 4 — класу Х. Відзначалися потужні викиди корональної маси та сильні геокосмічні бурі, які були сукупністю магнітних, іоносферних, атмосферних та електричних бур. Мета роботи — виклад результатів аналізу глобальних квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля протягом унікальної геокосмічної бурі 7—9 вересня 2017 р. Для аналізу часових варіацій використовувалися дані мережі магнітометрів «Intermagnet» на станціях Tamanrasset (22.79°N, 5.53°E), Duronia (41.35°N, 14.466°E), Lonjsko Polje (45.408°N, 16.659°E), Belsk (51.84°N, 20.79°E), Uppsala (59.903°N, 17.353°E), Abisko (68.358°N, 18.823°E) з роздільною здатністю близько 0.1 нТл і часовою дискретизацією в 1 хв. Аналізувалися добові варіації горизонтальних компонентів поля за 7—9 вересня 2017 р. Смугова фільтрація та системний спектральний аналіз виконано в діапазоні періодів 2...120 хв. При цьому одночасно використовувалися взаємодоповнювальні одне одного віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення на основі базисної функції Морле. Вивчено широтну залежність квазіперіодичних збурень горизонтальних складових геомагнітного поля протягом унікальної геокосмічної бурі та у контрольну добу. Визначено амплітуду, спектральний склад і тривалість збурень. Продемонстровано, що геокосмічна буря супроводжувалася як аперіодичними, так і квазіперіодичними збуреннями геомагнітного поля. Квазіперіодичні варіації мали місце в діапазоні періодів 35...55 і 70...110 хв. Квазіперіодичність посилювалася у міру зменшення географічної широти магнітної станції. При збільшенні географічної широти від 20° до 70° амплітуда збурень збільшувалася від 20 до 1500 нТл. Тривалість цугів коливань 8—9 вересня 2017 р. становила від одиниць годин до 16 год.

Ключові слова: магнітна буря, широтна залежність варіацій геомагнітного поля, аперіодичні та квазіперіодичні збурення, системний спектральний аналіз, параметри квазіперіодичних збурень.

L. F.Chernogor

Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua *M. B. Shevelev* Research Assistant V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

LATITUDINAL DEPENDENCE OF QUASI-PERIODIC VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD DURING THE GREATEST GEOSPACE STORM OF SEPTEMBER 7–9, 2017

Despite the Solar Cycle 24 minimum in the vicinity, September in 2017 was characterized by high astral activity, when 40 C-class, 15 M-class, and 4 X-class flares occurred. Huge coronal mass ejection events and strong geospace storms, sets of magnetic, ionospheric, and atmospheric storms as well as electric field disturbances, were reported. The purpose of this paper is to present the results of analysis of global-scale quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the unique geospace storm that occurred on September 7–9, 2017. To analyze the time variations, the data acquired at the 0.1-nT resolution and the 1-min sampling interval from the Intermagnet magnetometer network at the Tamanrasset (22.79°N, 5.53°E), Duronia (41.35°N, 14.466°E), Lonjsko Polje (45.408°N, 16.659°E), Belsk (51.84°N, 20.79°E), Uppsala (59.903°N, 17.353°E), Abisko (68.358°N, 18.823°E) observatories have been used. The local time variations in the horizontal field components that occurred on September 7-9, 2017 have been analyzed. Band-pass filtering and the system spectral analysis have been performed in the 2-120-min per cycle period range, when the mutually complementary short-time Fourier transform (SFT), the Fourier transform in a sliding window (FTS) with a width adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods, and the wavelet transform (WT) employing the Morlet wavelet as a basis function were used simultaneously. The latitudinal dependence of quasi-periodic disturbances in the horizontal components of the geomagnetic field during the unique geospace storm and on a reference day has been studied. The amplitude, spectral content, and the duration of the disturbances have been determined. The geospace storm has been shown to be accompanied by both the aperiodic and quasi-periodic disturbances in the geomagnetic field. The quasi-periodic variations occur in the 35–55- and 70–110-min per cycle period range. The quasi-periodicity strengthens as the geographic latitude of the magnetic observatory decreases. When the geographic latitude increases from $\sim 20^{\circ}$ to $\sim 70^{\circ}$, the amplitude of the disturbances increases from 20 to 1500 nT. The duration of the oscillation trains averages from a few ones to ~ 16 hours on September 8-9, 2017.

Key words: magnetic storm, latitudinal dependence of geomagnetic field variations, aperiodic and quasi-periodic disturbances, system spectral analysis, quasi-periodic disturbance parameters.

Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень

Social Sciences in Space Exploration

https://doi.org/10.15407/knit2020.02.084 УДК 006.032:629.78

Г. А. ПОЛЯКОВ, заст. Ген. констр., нач. комплексу, E-mail: info@yuzhnoye.com
Г. В. МАТУС, нач. відд., E-mail: info@yuzhnoye.com
С. М. ІЛЬЇНА, нач. сектору, E-mail: info@yuzhnoye.com
Є. Ю. ФЕСЕНКО, нач. групи, E-mail: phoenix.eto.ne@gmail.com

ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДНОГО ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСИФІКАТОРА ПІДПРИЄМСТВА «КЛАСИФІКАТОР ПОМИЛОК У КОНСТРУКТОРСЬКІЙ ДОКУМЕНТАЦІЇ» ПІД ЧАС НОРМОКОНТРОЛЮ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Наводяться основні практичні результати робіт науково-дослідного відділу стандартизації Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» щодо удосконалення процедури нормоконтролю конструкторської документації на підприємстві шляхом розроблення і застосування класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації». Висвітлено стадії розроблення класифікатора і порядок його застосування, методи класифікації та кодування об'єктів класифікації, структура коду об'єкту класифікації, уніфікована форма звітності, створення якої відбувається в автоматичному режимі.

Ключові слова: класифікація, кодування, класифікатор, нормоконтроль, конструкторська документація, уніфікована форма звітності.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У наявних умовах конкурентної боротьби метою кожного виробника є якість продукції, що визначає цінність продукту, насамперед, для споживачів під час його експлуатації. Рівень якості продукції, що розробляється підприємством, формується на таких етапах життєвого циклу виробу, як планування, розроблення та виготовлення. У свою чергу, невідповідності, що мають місце на ранніх етапах життєвого циклу виробу, спричиняють великі збитки. Отже, якість продукту доцільно планувати не тільки в процесі його виготовляння, а й на етапі розроблення, основним результатом якого є комплект конструкторської документації (далі — КД), що супроводжує виріб на всіх етапах його життєвого циклу. Відсутність КД унеможливлює процес створення та виготовлення виробу, його використання за призначенням. Комплект КД являє собою первинний та, відповідно, найбільш повний і точний носій інформа-

Цитування: Поляков Г. А., Матус Г. В., Ільїна С. М., Фесенко Є. Ю. Результати дослідного застосування класифікатор помилок у конструкторській документації» під час нормоконтролю конструкторської документації. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2 (123). С. 84—92. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.084

ції щодо технічного рівня продукції. У зв'язку з цим якість розроблюваної документації та правильна підготовка та організація виробництва продукції, експлуатація та ремонт виробу є величинами, що корелюють.

Якість КД забезпечується шляхом виконання таких процедур контролю: технічного, технологічного, метрологічного та нормоконтролю. На відміну від перших трьох видів контролю, що реалізуються в процесі виготовляння, нормоконтроль передбачає перевірку остаточно оформленої документації і, відповідно до вимог ГОСТ 2.111 [1], є завершальною стадією її розроблення.

Водночас, згідно з ГОСТ 2.111 [1], «нормоконтроль — контроль выполнения конструкторской документации в соответствии с нормами, требованиями и правилами, установленными нормативными документами. Нормоконтроль проводится в целях обеспечения однозначности применения конструкторской документации и установленных в ней норм, требований и правил на всех стадиях жизненного цикла изделия». Зріст виробничих і економічних зв'язків між підприємствами та організаціями однієї галузі, різноманітних галузей і навіть різних країн обумовлює важливість процесу контролювання виконання вимог стандартів. Оскільки нормоконтроль є найважливішим інструментом забезпечення якості КД і спроектованого виробу в цілому, удосконалення реалізації процесу проведення нормоконтролю повинно стати важливим напрямком діяльності кожного підприємства.

Порядок контролю в КД норм і вимог, встановлених нормативними документами (далі — НД) зі стандартизації, зміст нормоконтролю в залежності від виду документів, що складаються на всіх стадіях розроблення виробу, взаємодія учасників цього процесу здійснюється науководослідним відділом стандартизації Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» у чіткій відповідності до вимог ГОСТ 2.111 [1]. Та в умовах великого обсягу КД, що розробляється, ускладнення та різноманіття продукції, необхідності скорочення часу розроблення виробів, впровадження єдиного інформаційного простору на підприємстві, неоднозначність вимог НД, що регламентують правила виконання КД, а також скасування низки стандартів, розроблених до 1992 року, виявляють об'єкт удосконалення, а саме: схему взаємодії учасників процесу розроблення і контролю КД «Розробник КД — Нормоконтролер» та спосіб формування зауважень і пропозицій нормоконтролера, а також їхній зміст.

Доцільно відзначити, що рекомендована ГОСТ 2.111 [1] форма надання розробнику КД переліку зауважень і пропозицій нормоконтролера, а також вимоги щодо способів вирішення ймовірних конфліктів професійних інтересів створюють умови для суб'єктивного підходу до реалізації процедури нормоконтролю КД, що, в свою чергу, може суттєво ускладнювати взаємовідносини між учасниками розроблення КД, спричиняти збільшення строків її розробляння, знижувати якість виконання вимог НД та ефект від застосування засобів автоматизації конструкторської праці. Тому удосконалення процедури нормоконтролю КД стосовно визначення способів професійної взаємодії та послідовності дій учасників цього процесу, що сприятиме вирішенню об'єктивно обумовленого конфлікту протилежних інтересів взаємодіючих суб'єктів, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблематики скорочення строків і підвищення якості під час нормоконтролю КД як складової частини робіт зі стандартизації, а також уніфікації форм надання розробнику КД переліку зауважень і пропозицій нормоконтролера та їхнього змісту приділялось чимало уваги і раніше.

У статті «Конструкторська документація: методи автоматизованого контролю позначень нормативних документів» [2] наведено розроблений та експериментально відпрацьований під час нормоконтролю КД на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» метод автоматизованого контролю позначень НД. Метою його застосування є безумовне виключення з КД вимог скасованих НД, а також помилок у їхніх позначеннях. Результатом застосування методу є скорочення часу проведення нормоконтролю КД, а відповідно, й строків її розробляння.

Раціональність проведення робіт з класифікації і кодування техніко-економічної та соціальної інформації з метою удосконалення процедури нормоконтролю КД була обґрунтована у статті «Концепція удосконалення робіт зі стандартизації» [3]. Згідно із запропонованим підходом, доцільним є розроблення і застосування класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації», що дозволить зменшити час, який витрачається на нормоконтроль КД, підготувати базис для проведення нормоконтролю в умовах електронного документообігу, а також забезпечити однозначність розуміння змісту зауважень нормоконтролера розробником КД та уніфікацію процесу оформлення зауважень нормоконтролерів.

Водночас, результати опрацювання низки публікацій, присвячених розгляду створення системи цифрового кодування помилок, що визначаються під час нормоконтролю КД, підтверджують необхідність розроблення системи об'єктивної класифікації, що дозволяє реалізувати оперативний і достовірний пошук подібних об'єктів. Тому процес пошуку ознак, за якими слід вести класифікацію, є основним завданням під час виконання таких робіт. Пріоритетним напрямком вирішення поставленої задачі є підхід, згідно з яким було створено систему цифрового кодування зауважень і пропозицій нормоконтролера, що фіксує лише типові помилки. Так, наприклад, у залежності від значення і характеру помилки відносять до визначених категорій (груп):

• помилки, виявлення яких призводить до повернення документації без проведення нормоконтролю, а саме: необґрунтованість розробки, некомплектність тощо;

• помилки, що викликають виправний ґандж;

• помилки, що викликають невиправний ґандж;

 помилки, що викликають затримку у виробництві;

• помилки, що потребують лише випуску повідомлення про зміну та проведення відповідних виправлень в документації.

Наявність класифікатора типових помилок скорочує технічну роботу нормоконтролера, але, у свою чергу, свідчить лише про наявність проблем у розробників КД, що можливо та необхідно ліквідувати. Таким чином, діалектика класифікатора типових помилок полягає у фіксації їх наявності та пропозицій щодо типових методів ліквідації наслідків. Але оскільки виникнення типових помилок обумовлено однаковими причинами, найкращим способом їх усунення є виявляння та ліквідування причин, що їх викликають.

Такий підхід, на нашу думку, є обґрунтованим і доцільним лише в умовах формального нормоконтролю, за яким перш за все перевіряють:

• комплектність документації, відповідність позначень, наданих кожному документу, встановленій системі позначень;

• правильність виконання основного напису, у тому числі, наявність всіх необхідних підписів;

• правильність застосування термінів, знаків умовних позначень, наведення фізичних величин разом із їх позначенням у тексті, формулах і результатах вимірювань, правильність скорочення слів;

• наявність і правильність позначень стандартів та інших НД, на які є посилання у документації.

Однак розроблення та застосування такого класифікатора типових помилок втрачає сенс за умов функціонального нормоконтролю, за яким перевіряють:

• відповідність основних параметрів спроектованого об'єкту вимогам стандартів і технічних умов, характеристикам затвердженої номенклатури типових параметрів об'єктів;

• відповідність нормативних параметрів, показників технічного рівня і рівня якості вимогам стандартів та інших НД;

• відповідність методів контролю та випробувань (за їхньої наявності у документах, що контролюються) вимогам відповідних НД;

• рівень стандартизації та уніфікації виробу, що розробляється, та можливість розширення цих показників.

Беручи до уваги наведене, вирішення сформульованих у статті задач під час реалізації саме функціонального нормоконтролю обумовлює необхідність розроблення та застосування класифікатора, що забезпечить максимальну оглядовість номенклатури помилок, які можуть бути встановлено під час нормоконтролю КД.

Мета статті. Метою статті є обґрунтування необхідності застосування класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації» під час нормоконтролю КД, що дозволить скоротити час, що витрачається на нормоконтроль КД, підготувати базис для проведення нормоконтролю в умовах електронного документообігу, а також забезпечити однозначність розуміння змісту зауважень нормоконтролером і розробником КД та уніфікацію процесу оформлення зауважень нормоконтролерів.

Виклад основного матеріалу. Роботи з класифікації і кодування техніко-економічної та соціальної інформації є одними із найважливіших напрямків робіт, реалізація яких необхідна для вирішення завдань стандартизації. Це упорядкування, уніфікація, класифікація і кодування техніко-економічної та соціальної інформації, забезпечення однозначності і порівнянності даних, що використовуються під час опису об'єктів техніко-економічної та соціальної інформації, створення умов щодо автоматизації процесів оброблення інформації разом із створенням автоматизованих банків даних та інше.

Процес класифікації являє собою розподіл множини об'єктів на підмножини згідно з їх подібністю або відмінністю у відповідності із встановленими методами. Природно, що чим докладніше проведена класифікація, тим більше у ній рівнів поділу підпорядкованих ознак.

У свою чергу, кожна ознака ототожнюється із відповідним цифровим кодом. Процес кодування полягає у створенні за визначеними правилами та наданні кодів об'єкту чи групі об'єктів, що дозволяє замінити декількома знаками назви цих об'єктів. За допомогою кодів забезпечується ідентифікація об'єктів максимально малою кількістю знаків.

Фахівцями науково-дослідного відділу стандартизації Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» було виконано роботи із розроблення системи класифікації помилок у КД. Результатом таких робіт є класифікатор підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації», що вміщує усі ймовірні помилки, які може бути знайдено під час нормоконтролю КД, та який було введено в дію на підприємстві як пробний з метою його дослідного застосування під час нормоконтролю.

Доцільно відзначити, що під час розроблення та застосування класифікатора було виконано такі основні роботи:

• визначення структури коду помилок;

• визначення та затвердження вихідних даних щодо розроблення класифікатора;

 підготовка першої редакції проекту класифікатора;

 розсилання першої редакції проекту класифікатора до підрозділів підприємства з метою отримання відгуків та погодження;

 внесення змін до класифікатора на підставі зауважень та пропозицій підрозділів підприємства;

 розроблення остаточної редакції проекту класифікатора;

• затвердження класифікатора;

• надання чинності на підприємстві класифікатору як пробному строком на один рік.

Об'єктами класифікації зазначеного документу є помилки розробників КД, яких було виявлено в процесі проведення нормоконтролю КД.

Структурно основна частина класифікатора вміщує такі графи:

• «Код», в якій наведено коди помилок;

• «Ошибка», в якій наведено опис помилок (невідповідності вимогам НД);

• «Объект проверки», в якій наведено зміст (об'єкт) перевірки, що здійснює нормоконтролер.

Під час розроблення системи класифікації помилок в КД було застосовано:

• ієрархічний метод класифікації, що полягає у послідовному розподілі вихідної множини об'єктів на підпорядковані підмножини (класифікаційні угруповання), а ті, у свою чергу, на дрібніші класифікаційні категорії. Тобто множина об'єктів поділяється на класи, групи, види і так далі за основними ознаками, що характеризують ці об'єкти. При цьому всі класифікаційні угруповання становлять єдину систему, між частинами якої встановлюється відношення підпорядкування, а в цілому вони являють собою



Рис. 1. Структура коду помилки

сукупність спільних ознак з головним об'єктом класифікації;

• послідовний метод кодування, що полягає у створенні коду об'єкта класифікації або класифікаційного угруповання із застосуванням кодів послідовно розміщених підлеглих угруповань, отриманих в умовах ієрархічного методу класифікації, та надання цього коду відповідному об'єкту.

Перевагами вибраних методів класифікації і кодування є:

• логічність;

• послідовність;

пристосованість щодо ручного оброблення інформації;

• можливість доповнення даних новими кодами без зміни кодів, що встановлено.

Під час проведення робіт із розроблення системи класифікації було детерміновано наступну послідовність побудови ієрархічної класифікації об'єктів:

• визначення множини об'єктів, що необхідно класифікувати, з метою вирішення конкретних задач;

• відокремлення основних ознак (властивості, параметри тощо), за якими множина має бути поділена на підмножини;

• вибір порядку наведення ознак — рівень поділу та їх кількість.

Позначення коду помилки чітко відстежується збіжністю об'єкта перевірки. Як результат кодове позначення угруповання дає інформацію щодо послідовності ознак, що характеризують це угруповання.

Структуру коду помилки класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації» наведено на рис. 1. Відповідно до структури коду: • перший, другий та третій знаки — код ознаки перевірки:

— перший знак — ознака угруповання перевірок:

1 — КД усіх видів;

2 — НД, що застосовуються в КД усіх видів;

3 — текстові КД;

4 — графічні КД;

5 — повідомлення про зміну;

 другий та третій знаки — порядковий номер ознаки перевірки (від «01» до «99»);

— четвертий та п'ятий знаки — категорія перевірки (від «01» до «99»);

— шостий та сьомий знаки — підкатегорія перевірки (від «1» до «99»);

— восьмий та дев'ятий знаки — позиція підкатегорії перевірки (від «1» до «99»).

Примітка. Знаки з шостого до дев'ятого долучають до структури коду тільки за необхідністю подальшої деталізації помилок.

Приклади.

1) «201.01» — код помилки під час перевірки позначень НД, що застосовуються в КД, де:

• «201» — код ознаки перевірки НД:

- «2» — ознака угруповання перевірок (НД,

що застосовуються в КД усіх видів);

— «01» — порядковий номер ознаки перевірки НД;

• «01» — порядковий номер категорії перевірки (перевірка позначень НД).

2) «301.02.1» — код помилки під час перевірки змісту і оформлення ТТЗ (ТЗ), де:

• «301» — код ознаки перевірки текстового конструкторського документу:

— «3» — ознака угруповання перевірок (текстові КД); Результати дослідного застосування класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у КД» під час нормоконтролю...

Дата получения:	
Подпись разработчика:	
Фамилия:	

Информация об ошибках в конструкторском документе

Обозначение КД Извещение Попразделение			
Тема Разработчик			
Номер листа	Код ошибки по классификатору	Описание ошибки	
1	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст к	примечания	
2	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст к	примечания	
3	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст к	примечания	
4	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст г	примечания	
5	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст к	примечания	
6	Описан класси	ние ошибки в соответствии с фикатором	
	Текст к	примечания	
Количество листов в д	цокументе		
Дата нормоконтроля			
Нормоконтролер			
	no	дпись	

Рис. 2. Уніфікована форма надання розробнику КД переліку помилок, виявлених під час нормоконтролю КД

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 2

 — «01» — порядковий номер ознаки перевірки текстового конструкторського документу;

• «02» — порядковий номер категорії перевірки (перевірка оформлення ТТЗ (ТЗ));

• «1» — порядковий номер підкатегорії перевірки.

3) «301.01.20.10» — код помилки під час перевірки правильності оформлення посилання на рисунки у тексті, де:

• «301» — код ознаки перевірки текстового конструкторського документу:

— «3» — ознака угруповання перевірок (текстові КД);

 — «01» — порядковий номер ознаки перевірки текстового конструкторського документу;

• «01» — порядковий номер категорії перевірки (перевірка оформлення текстової КД);

• «20» — порядковий номер підкатегорії перевірки;

• «10» — порядковий номер позиції підкатегорії перевірки.

Кожному коду об'єкта класифікації відповідає його назва (графа «Ошибка»), яка являє собою словесний опис об'єкта, що дає змогу відрізняти його від інших об'єктів класифікації. Роботи із надання назв кожному об'єкту класифікації здійснювались у чіткій відповідності до наступних вимог:

 назви об'єктів класифікації повинні бути однозначно зрозумілими, несуперечливими, складеними із застосуванням термінів та визначень понять, встановлених термінологічними системами;

• назва об'єкту в класифікаторі повинна однозначно відповідати об'єкту класифікації;

• назви об'єктів не повинні дублюватися;

• побудова і написання назв об'єктів в класифікаторі повинні бути взаємопов'язані із уніфікованою формою звітності щодо помилок, виявлених під час нормоконтролю КД.

Принципи і систему класифікації та кодування, структуру кодів, цифрове кодування було розроблено з урахуванням можливості їх використання під час оброблення інформації за допомогою автоматизованих методів, з метою створення уніфікованої форми надання розробнику КД переліку помилок, знайдених під час нормоконтролю КД. Уніфікована форма звітності являє собою сукупність реквізитів, установлених відповідно до завдань, які підлягають вирішенню під час нормоконтролю КД, і розташованих на носії інформації у визначеному порядку.

Розробляння уніфікованої форми звітності відбувалось за методом змістової уніфікації, яка полягає у створенні типової форми надання інформації, побудові єдиної моделі документу, уніфікації і стандартизації інформаційних елементів та показників, що використовуються. Уніфіковану форму надання розробнику КД переліку помилок, виявлених під час нормоконтролю КД, наведено на рис. 2.

Висновки. Таким чином, наведена у статті система класифікації та кодування помилок, які можуть бути встановлено під час нормоконтролю КД, передбачає:

• високий рівень автоматизації оброблення інформації;

• мінімальний час оброблення великих масивів інформації;

• проведення нормоконтролю в умовах електронного документообігу;

• практично необмежені можливості розширення номенклатури об'єкту класифікації.

Отримані результати підтверджують перспективність обраного напрямку робіт та дозволяють зробити висновок, що створювана система, яка відображена у класифікаторі підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації», буде сприяти вирішенню питань щодо удосконалення процедури нормоконтролю КД, а саме:

• скорочення робочого часу нормоконтролерів, що витрачається на процедуру опису помилок;

• уніфікацію процесу оформлення та форми зауважень нормоконтролерів;

• однозначність розуміння змісту зауважень нормоконтролером і розробником КД.

Таким чином, виконаний комплекс робіт сприяє впровадженню електронного документообігу КД на підприємстві.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. ГОСТ 2.111-68. Единая система конструкторской документации. Нормоконтроль. Львов: НТЦ «Леонорм-стандарт», 2001. 3 с. (Межгосударственный стандарт).
- 2. Фесенко Є. Ю., Кремена Є. В. Конструкторська документація: метод автоматизованого контролю позначень нормативних документів. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2016. № 2. С. 29—31.
- 3. Шипко О. Ф., Матус Г. В., Ільїна С. М. та ін. Концепція удосконалення робіт зі стандартизації. *Стандартизація, сертифікація, якість.* 2017. № 3. С. 72—82.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2019

REFERENCES

- 1. HOST 2.111-68. (2001). Unified system for design documentation. Normocontrol. Lviv : NTTs «Leonorm-standart» [in Russian].
- 2. Fesenko, E. Yu., Kremena, E. V. (2016). Design documentation: the method of automated control of designations of normative documents. *Standardization, certification, quality,* № 2, 29–31 [in Ukrainian].
- 3. Shypko, O. F., Matus, G. V., Ilyina, S. N., et al. (2017). The conception of improvement activities of standardization. *Standardization, certification, quality*, № 3, 72–82 [in Ukrainian].

Received 05.07.2019

Г. А. Поляков, зам. Ген. констр., нач. комплекса

- E-mail: info@yuzhnoye.com
- Г. В. Матус, нач. отдела
- E-mail: info@yuzhnoye.com
- С. Н. Ильина, нач. сектора
- E-mail: info@yuzhnoye.com
- *Е. Ю. Фесенко*, нач. группы
- E-mail: phoenix.eto.ne@gmail.com

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» ул. Криворожская 3, Днипро, Украина, 49008

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КЛАССИФИКАТОРА ПРЕДПРИЯТИЯ «КЛАССИФИКАТОР ОШИБОК В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ» ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУРЫ НОРМОКОНТРОЛЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Приводятся основные практические результаты работ научно-исследовательского отдела стандартизации Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» в части совершенствования процедуры проведения нормоконтроля конструкторской документации на предприятии за счет разработки и применения классификатора предприятия «Классификатор ошибок в конструкторской документации». Описаны стадии разработки и применения классификатора, методы классификации и кодирования объектов классификации, структура кода объекта классификации, унифицированная форма отчетности, формируемая в автоматическом режиме.

Ключевые слова: классификация, кодирование, классификатор, нормоконтроль, конструкторская документация, унифицированная форма отчетности.

H. Polyakov, Deputy Chief Designer, Head of complex E-mail: info@yuzhnoye.com
G. Matus, Head of department
E-mail: info@yuzhnoye.com
S. Ilyina, Head of sector
E-mail: info@yuzhnoye.com
E. Fesenko, Head of group
E-mail: phoenix.eto.ne@gmail.com
Yuzhnoye State Design Office
3, Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

THE RESULTS OF THE TRIAL EXPLOITATION OF THE "ERROR CLASSIFIER IN DESIGN DOCUMENTATION" DURING THE PROCEDURE OF STANDARDS COMPLIANCE MONITORING OF DESIGN DOCUMENTATION

The article presents the main practical results of the activity of the scientific and research standardization department of Yuzhnoye State Design Office for the improving the standards compliance monitoring procedure of design documentation at the enterprise through the development and the application of the enterprise classifier "Error classifier in design documentation". The stages of development and application of the classifier, methods of classification and coding of classified objects, the code structure of the classified object, the unified reporting form generated in an automatic mode are described.

Keywords: classification, coding, classifier, standards compliance monitoring, design documentation, unified reporting form.

Історія космічних досліджень

History of Space Research



ДО 70-РІЧЧЯ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ДОКТОРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ НАУК ПРОФЕСОРА ЧОРНОГОРА ЛЕОНІДА ФЕОКТИСТОВИЧА

2 червня 2020 р. виповнюється 70 років від народження нашого друга і колеги, визнаного в Україні та за її межами вченого в галузі радіофізики та геокосмофізики ЧОРНОГОРА Леоніда Феоктистовича.

Після закінчення в 1967 р. середньої школи його, як учасника і переможця низки олімпіад з фізики, математики та хімії, запросили до вступу у славетний Харківський державний університет ім. О. М. Горького. Пропозиції до вступу були з декількох факультетів, але він обрав саме радіофізичний факультет. Після закінчення навчання на кафедрі космічної радіофізики ХДУ ім. О. М. Горького в 1972 р. він отримує диплом з відзнакою та рекомендацію до вступу в аспірантуру. Ще студентом він був зарахований молодшим науковим співробітником кафедри космічної радіофізики та став співавтором низки наукових робіт зі спецтематики, які були опубліковані в закритих журналах і наукових звітах.

В університеті у нього були чудові вчителі: професор Я. П. Бланк (вища математика), професор В. І. Пересада (загальна фізика), доцент В. І. Чоботарьов (теоретична радіотехніка), доцент Л. Є. Паргаманник (теоретична фізика), доцент Б. В. Кондратьєв (математична фізика), професор П. В. Бліох (статистична радіофізика, фізика атмосфери та космосу, фізика плазми, актуальні проблеми космічної радіофізики), професор В. О. Місюра (фізика космосу, поширення радіохвиль, радіофізичні методи дослідження атмосфери та космосу) та багато інших.

Леонід Чорногор достроково закінчує аспірантуру та захищає кандидатську дисертацію у 1975 р. за спеціальністю «радіофізика, включаючи квантову радіофізику», присвячену розв'язанню військово-прикладних задач. Наступні 10 років, працюючи доцентом і старшим науковим співробітником кафедри космічної радіофізики, він у статусі спочатку заступника наукового керівника, а згодом і керівника напрямку та наукового керівника успішно виконав низку оборонних проектів, заданих Постановами уряду країни. У 1980-ті рр. за успішне втілення результатів проектів він був удостоєний двох Премій Ради Міністрів СРСР і Державної премії УРСР.

Після блискучого захисту у 1987 р. докторської дисертації його було обрано професором кафедри космічної радіофізики. Близько 50 років своєї праці він прославляє Харківський державний університет ім. О. М. Горького, а тепер — Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна.

Справжній розквіт ученого і педагога розпочався після проголошення незалежності України. Відійшовши від розв'язання проблем оборонного характеру, він зосередив увагу на фундаментальних питаннях космічної радіофізики, радіофізики геокосмосу, нелінійної радіофізики, теорії та практики дистанційного радіозондування, теорії сигналів, фізичної екології, космічної погоди тощо. Леонід Чорногор став засновником декількох наукових напрямків, справжньої наукової школи. Учні його школи працюють у багатьох наукових закладах України та зарубіжжя.

Наукові заслуги Леоніда Чорногора не залишились непомітними. В 2016 р. він був удостоєний звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

Упродовж багатьох років він співпрацює із закордонними фахівцями. Особливо тісне співробітництво налагоджено зі вченими КНР. Китайські колеги обрали його Почесним професором Харбінського інженерного університету та Циндаоського університету. Леонід Чорногор не тільки видатний вчений, але й талановитий педагог. Він розробив і прочитав понад 20 курсів. Близько п'яти тисяч колишніх студентів згадують його чудові лекції з фізики космосу, нелінійної радіофізики та багатьох спецкурсів. Він підготував більш ніж 20 кандидатів наук і двох докторів наук. У 2010 р. Вчена рада ХНУ імені В. Н. Каразіна присудила йому звання «Почесний професор ХНУ імені В. Н. Каразіна». Національна академія наук України нагородила його відзнакою «За підготовку наукової зміни».

Леонід Чорногор — автор і співавтор понад 1200 наукових праць, 17 навчальних посібників і підручників, 13 монографій, виданих як в Україні, так і за кордоном. Він доповідав близько 600 разів на міжнародних і національних конференціях.

Леонід Чорногор як автор і рецензент активно співпрацює з журналом «Космічна наука і технологія».

Бажаємо ювіляру міцного здоров'я, талановитих і вдячних учнів — гідних продовжувачів наукових напрямків свого вчителя, нових успіхів у науці та житті.

> М. О. Азарєнков, В. М. Івченко, О. О. Коноваленко, Л. М. Литвиненко, П. М. Мележик, О. К. Черемних, В. М. Шульга, С. М. Шульга, Ю. М. Ямпольський, Я. С. Яцків



ПРОФЕСОР ЄЛИЗАВЕТА КОРДЮМ— ЧЛЕН ЗАЛИ СЛАВИ МІЖНАРОДНОЇ АСТРОНАВТИЧНОЇ ФЕДЕРАЦІЇ

Бюро Міжнародної астронавтичної федерації (МАФ) підтримало ініціативу Генерального директора Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», віцепрезидента МАФ зі зв'язків з промисловістю (2015—2018), академіка НАН України О. В. Дегтярева і занесло до Зали слави Міжнародної астронавтичної федерації засновницю наукової школи з космічної біології, завідувачку відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України члена-кореспондента НАН України Єлизавету Львівну Кордюм. Про це ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» повідомила президент Федерації пані Паскаль Еренфройнд.

Нагорода присуджується щорічно видатним діячам космічної галузі за особистий внесок у розвиток світової космонавтики. Це вже другий представник України, який отримав таке високе визнання. У 2017 році до Зали слави МАФ було занесено Генерального конструктора — Генерального директора ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» в 1991—2010 роках Станіслава Миколайовича Конюхова.

Щиро вітаємо Єлизавету Львівну з цією нагородою та бажаємо їй міцного здоров'я, наснаги і подальших професійних успіхів!

Є. Л. Кордюм народилася 3 листопада 1932 року в Києві. Закінчила Київський державний університет ім. Т. Г. Шевченка за спеціальністю «біолог-ботанік» (1955 р.).

3 1959 р. — в Інституті ботаніки ім. М. Г. Холодного: з 1976 р. — завідувачка відділу клітинної біології та анатомії, водночас у 1998—2003 рр. — заступник директора з наукових питань.

У 1970-і роки започаткувала новий напрям досліджень із космічної біології. Під її керівництвом уперше опрацьовано результати спільного радянсько-американського експерименту за програмою «Союз-Аполлон» та отримано дані про вплив факторів космічного польоту на одноклітинні організми.

Автор і науковий керівник спільного українсько-американського експерименту за програмою польоту першого космонавта України Л. К. Каденюка (1995—1998), в ході якого установлено гравічутливість рослинних клітин та загальні закономірності впливу мікрогравітації на клітину.

Доктор біологічних наук (1969), професор (1986). Лауреат Державної премії УРСР у галузі науки і техніки (1979) та премії ім. М. Г. Холодного АН УРСР (1979). Заслужений діяч науки УРСР (1984). Член-кореспондент НАН України (2000). Повний кавалер ордена княгині Ольги (1998, 2003, 2007).

> (Is caŭmy http://nas.gov.ua/UA/Messages/ Pages/View.aspx?MessageID=6349)