НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 17 3 + 2011

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

3MICT

З Указу Президента України № 594/2011

Шувалов В. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С., Носиков С. В. Потери мощности солнечных батарей космического аппарата в полярной ионосфере и в магнитосфере Земли

Шелковенков Д. А. Многофункциональный программно-алгоритмический комплекс предварительной обработки ГНСС-наблюдений ОСТАVA_РРА

Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф., Черняк В. Я., Орловська С. Г., Свєчнікова О. С., Карімова Ф. Ф., Шкоропадо М. С. Фізичні основи конструювання двигуна на парафіновому паливі для гібридних ракет. Кінетика плавлення і горіння

Федоренко А. К. Направления распространения акустико-гравитационных волн над полярными шапками Земли

Бурлак О. П., Міхєєв О. М., Заєць І. Є., Жан-Поль де Вера, Лорек А., Конч А., Фоїне Б., Козировська Н.О. Захист фотосистеми II Kalanhoe daigremontiana бактерійним консорціумом у модельних марсіанських умовах

© НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2011 © ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2011

CONTENTS

- 3 Decree of the President of Ukraine (№ 594/2011)
- 5 *Shuvalov V. A., Pismenny N. I., Kochubey G. S., Nosikov S. V.* Power losses for solar arrays of a spacecraft in the Earth's polar ionosphere and magnetosphere
- 16 Shelkovenkov D. A. Multifunctional software-algorithmic complex for pre-processing of GNSS-observations, OC-TAVA_PPA
- 28 Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F., Chernyak V. Ya., Orlovskaya S. G., Svechnikova O. S., Karimova F. F., Shkoropado M. S. Physical foundation for the construction of paraffin-based hybrid rocket engines. Kinetics of melting and combustion
- 34 *Fedorenko A. K.* Propagation directions of acoustic gravity waves above the polar caps of the Earth
- 45 Burlak O. P., Mikheev O. M., Zaets I. Ye., de Vera J.-P., Lorek A., Koncz A., Foing B. H., Kozyrovska N. O. Photosystem II of Kalanhoe daigremontiana sheltered by bacterial consortium under Mars-like conditions

Кочубей С. М., Казанцев Т. А. Использование деривативных вегетационных индексов для оценки содержания хлорофилла в растительности по данным измерений из космоса

Бушуев Ф. И., *Калюжный Н. А., Сливинский А. П., Шульга А. В.* Использование сигналов вещательных FMстанций для исследований численности метеоров

Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных космических объектов с использованием способа накопления кадров со смещением

НАШІ АВТОРИ

- Kochubei S. M., Kazantsev T. A. The use of derivative vegetation indices for the estimation of chlorophyll content in vegetation on the basis of satellite data
- **60** Bushuev F. I., Kalyuzhny N. A., Slivinsky A. P., Shulga A. V. The use of FM-signals of broadcasting stations for meteor quantity investigation
- 71 *Kozyrev Ye. S., Sybiriakova Ye. S., Shulga O. V.* TV observations of low Earth orbit objects using frame accumulation with shift

77 OUR AUTHORS

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

Підписано до друку 17.06.11. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет. Ум. друк. арк. 8,19. Обл.-вид. арк. 8,60. Тираж 100 прим. Зам. № 3000.

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

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

УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 594/2011



Про присудження Державних премій України в галузі науки і техніки 2010 року

На підставі подання Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки постановляю:

Присудити Державні премії України в галузі науки і техніки 2010 року:

— за роботу «Розвиток теоретичних основ, розробка та застосування поляриметричних методів і апаратури для дистанційного зондування об'єктів Сонячної системи наземними та аерокосмічними засобами»:

КИСЕЛЬОВУ Миколі Миколайовичу — докторові фізико-математичних наук, головному науковому співробітникові Головної астрономічної обсерваторії НАН України

РОЗЕНБУШ Вірі Калениківні — докторові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Головної астрономічної обсерваторії НАН України

ТИШКОВЦЮ Віктору Павловичу — докторові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Радіоастрономічного інституту НАН України

БЕЛЬСЬКІЙ Ірині Миколаївні — докторові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

ЛУПІШКУ Дмитру Федоровичу — докторові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

КАЙДАШУ Вадиму Григоровичу — кандидатові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

ЄФІМОВУ Юрію Сергійовичу — кандидатові фізико-математичних наук, провідному науковому співробітникові Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія»

МІЩЕНКУ Михайлу Івановичу — докторові фізико-математичних наук, головному науковому співробітникові Годдардівського інституту космічних досліджень НАСА, США

ШАХОВСЬКОМУ Миколі Михайловичу — кандидатові фізико-математичних наук (посмертно)

КУЧЕРОВУ Віталію Анатолійовичу — кандидатові фізико-математичних наук (посмертно).

Президент України Віктор ЯНУКОВИЧ 20 травня 2011 року Редакційна колегія та редакція журналу «Космічна наука і технологія» щиро вітають нагороджених та бажають подальших успіхів у розвиткові аерокосмічної галузі України УДК 533.27; 539.2

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

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

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ И В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Розроблено розрахунково-експериментальну процедуру прогнозу втрат електричної потужності кремнієвих сонячних батарей КА під час тривалої експлуатації на кругових орбітах у полярній іоносфері та у магнітосфері Землі. Визначено втрати потужності сонячних батарей, обумовлені впливом окремих факторів навколосупутникового середовища. Показано, що інтегральні величини втрат потужності сонячних батарей (з урахуванням впливу окремих факторів навколосупутникового середовища) узгоджуються з результатами супутникових вимірювань.

введение

Солнечные батареи (СБ) широко используются на космических аппаратах (КА) в качестве первичного источника электрической энергии. Увеличение энергопотребления и ресурса КА предъявляют жесткие требования к стойкости СБ к воздействию околоспутниковой среды на орбите. Воздействие на СБ комплекса факторов околоспутниковой среды интенсифицирует деградационные процессы в материалах и элементах конструкций СБ, ухудшает их эксплуатационные характеристики, приводит к сокращению ресурса, потерям электрической мощности и, как следствие, к уменьшению срока активного существования КА [9].

Несмотря на интенсивное развитие в последние годы многопереходных фотоэлектронных преобразователей (ФП) солнечных элементов СБ на основе арсенид-галлия, кремниевые монокристаллические фотопреобразователи попрежнему остаются основным типом ФП для СБ космических аппаратов.

Основными составляющими околоспутниковой среды, воздействующей на СБ в ионосфере и магнитосфере Земли, являются потоки газа, плазмы и электромагнитного излучения. Потому проблема взаимодействия СБ с околоспутниковой средой близка к проблеме взаимодействия материалов наружных покрытий и элементов конструкций КА с потоками газа, плазмы и излучения на орбите. Проблема имеет фундаментальное и прикладное значение. Одним из этапов её решения является моделирование взаимодействия СБ с окружающей средой и прогнозирование спада электрической мощности СБ, обусловленного таким взаимодействием.

Несмотря на значительный опыт эксплуатации СБ на КА, практически отсутствуют модели прогноза потерь электрической мощности СБ из-за воздействия факторов околоспутниковой среды при длительном сроке эксплуатации на орбите. Точность интерпретации результатов спутниковых измерений во многом зависит от достоверности информации об условиях эксплуатации СБ на орбите, эрудиции и интуиции экспериментаторов. Относительная сложность и высокая стоимость натурных испытаний не позволяют считать их приемлемым средством для детального изучения влияния отдельных факторов околоспутниковой среды на СБ, не позволяют выделить их вклад в интегральные характеристики СБ. Поэтому при построении моделей взаимодействия СБ с околоспутнико-

[©] В. А. ШУВАЛОВ, Н. И. ПИСЬМЕННЫЙ, Г. С. КОЧУБЕЙ,

С. В. НОСИКОВ, 2011

вой средой значительная роль отводится численному и физическому экспериментам. Такие исследования позволяют из широкого спектра процессов, протекающих на орбите, выделить основные эффекты, изучить их природу, провести параметрический анализ и сформулировать уточненные модели.

Целью данной работы является разработка по результатам физического и численного экспериментов процедуры прогноза спада мощности СБ из-за длительного воздействия околоспутниковой среды на круговых орбитах в ионосфере и магнитосфере Земли.

КРИТЕРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ СРЕДЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Изменение электрической мощности СБ на орбите — результат интегрального воздействия комплекса факторов околоспутниковой среды, присущих условиям эксплуатации КА. Интегральную характеристику спада нормированной электрической мощности солнечной батареи ΔP_{Σ} аппроксимирует соотношение [17]

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}(t)}{P_0} = \sum_{i=1}^m k_i \frac{\Delta P_i(t)}{P_0} , \qquad (1)$$

где P_0 — начальное значение мощности, t время эксплуатации на орбите, $\Delta P_i(t)/P_0 = 1$ — $-P_i(t)/P_0$ — изменение мощности, обусловленное воздействием *i*-го фактора околоспутниковой среды, k_i — коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние отдельных факторов и эффекты наложения [5, 13], m — количество факторов. Соотношение (1) получено на основе принципа производства максимума необратимой составляющей энтропии, в предположении, что величина $\Delta P_i(t)/P_0$ пропорциональна приращению необратимой составляющей энтропии и является количественной мерой накопленных повреждений (используется принцип линейного суммирования повреждений).

Количество факторов *m* выбирается для конкретного KA, а величина коэффициента $0 \le k_i \le 1$ определяется вкладом каждого фактора. Так, потери мощности CБ из-за загрязнения защитных стекол в результате радиационной электризации (пробои с образованием трещин, кратеров, сквозных каналов, выбросом и оседанием продуктов деструкции материалов СБ на поверхности защитных стекол [2, 3, 17, 20]) по оценке [45] составляют 31 %. Термоциклирование стабилизирует процесс газовыделения: снижает выходы радиационного газовыделения из углепластика каркаса СБ до 35 % [8]. Загрязнение защитных стекол, в том числе из-за радиационной электризации и термоциклирования, учитывается как отдельный фактор, поэтому можно принять $k_{37} \approx 0.69$ и $k_{71} \approx 0.65$.

Основным условием численного моделирования длительного воздействия ионизирующего излучения при оценке потерь электрической мощности СБ является равенство эквивалентных флюенсов электронов с энергией 1 МэВ для частиц, проникающих через защитное покрытие на поверхность фотопреобразователей: $F_e^{(M)} = F_e^{(H)}$ (индекс «*M*» — моделирование; «*H*» — орбита).

Условием эквивалентности термоциклических воздействий при физическом моделировании в вакууме является равенство количества N и размаха термоциклов: $N^{(M)} = N^{(H)}$; $\Delta T^{(M)} =$ $= \Delta T^{(H)} (\Delta T = T_{max} - T_{min}; T_{max}^{(M)} \approx T_{max}^{(H)} -$ максимальная, $T_{min}^{(M)} \approx T_{min}^{(H)} -$ минимальная температура СБ на орбите и на стенде).

При моделировании воздействия радиационной электризации на СБ должно выполняться равенство флюенсов $F_{eh}^{(M)} = F_{eh}^{(H)}$ и энергий $W_{eh}^{(M)} = W_{eh}^{(H)}$ высокоэнергичных электронов на орбите в магнитосфере Земли и на стенде (3 ≤ $\leq W_{eh} \leq 20$ кэВ). Для полярной ионосферы к этим условиям необходимо добавить критерии и параметры подобия, характеризующие электрофизическое взаимодействие твердого тела с «горячими» авроральными электронами при синхронном плазмогазодинамическом взаимодействии СБ с потоком «холодной» ионосферной плазмы. При условии адекватности процесса заряжания, накопления высоковольтного заряда и равенстве скоростей быстрых (авроральных) электронов используются следующие соотношения для плотностей тока положительных ионов «холодной» плазмы и быстрых авроральных электронов [19]:

$$\frac{j_{eh}^{(M)}}{j_{eh}^{(H)}} = \frac{n_{eh}^{(M)}}{n_{eh}^{(H)}} = \frac{j_{iW}^{(M)}}{j_{iW}^{(H)}} = \zeta_{eh}, \qquad (2)$$

где j_{eh} — плотность потока авроральных электронов, n_{eh} — концентрация авроральных электронов, j_{iW} — плотность потока ионов «холодной» плазмы на поверхность твердого тела.

Условием моделирования многофакторного загрязнения защитных стекол СБ является равенство значений и зависимостей интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения $\alpha_{S}^{(M)}(t) = \alpha_{S}^{(H)}(t)$.

При моделировании деградации мощности СБ из-за воздействия плазменных струй электрореактивных двигателей (ЭРД) должны выполняться равенства: $q^{(M)} = q^{(H)}$ удельных зарядов и $W_i^{(M)} = W_i^{(H)}$ энергий односортных ионов, переносимых струей ЭРД на поверхность СБ на орбите и на стенде.

Для полярной ионосферы на высотах 300.... 800 км в дополнение к воздействию ионизирующего излучения, термоциклирования в вакууме, загрязнения защитных стекол и электризации авроральными электронами добавляется воздействие атомарного кислорода (АК). Моделирование физико-химического воздействия АК определяется условиями равенства скоростей или энергий частиц, бомбардирующих поверхность $U^{(M)} = U^{(H)}$, и интегральных флюенсов $F_0^{(M)} = F_0^{(H)}$ [18].

Условием моделирования воздействия УФ-излучения является равенство потоков мощности излучения на облучаемой поверхности в единицах эквивалентного солнечного часа для идентичных диапазонов длин волн.

Перечисленные условия и соотношения использовались в данной работе при физическом и численном моделировании взаимодействия СБ с околоспутниковой средой на круговых орбитах в полярной ионосфере и магнитосфере Земли.

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ИЗ-ЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ СРЕДЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Геостационарная орбита, высота $h \approx 36\,000$ км, наклонение $\theta \approx 0^\circ$. Основными факторами воздействия околоспутниковой среды на солнечные батареи геостационарных космических аппаратов являются: ионизирующее излучение,



Рис. 1. Изменение нормированной мощности P/P_0 кремниевых солнечных батарей при воздействии ионизирующего излучения и термоциклирования: a — от времени t (кривая 1 — аппроксимация (3) при $\xi = 0.875$ и $\eta = 4.3$, кривая 2 — аппроксимация (3) при $\xi = 0.96$ и $\eta = 1.1$; кружки — данные [17]; точка — [26]; треугольник — [30]; квадратик — [10]; ромбик — [35]); δ — от количества термоциклов N (кружки — исследования авторов; точка — данные [26]; светлые треугольники — [30]; квадратики — [10]; ромбик — [35]; темный треугольник — средняя за год величина [31]; кривая 3 — усредняющая зависимость $P(N)/P_0$)

термоциклирование в вакууме, радиационная электризация, солнечное УФ-излучение, загрязнение защитных стекол СБ и плазменные струи электрореактивных двигателей (если ЭРД используются для стабилизации КА на орбите).

На рис. 1, *а* (кривая *I*) представлены расчетные значения зависимости изменения нормированной мощности $P(t)/P_0$ кремниевых солнечных батарей во времени, характеризующие влияние ионизирующего излучения в магнитосфере Земли на геостационарной орбите. Расчеты выполнены авторами для СБ из солнечных элементов кремний *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho =$ =10 Ом · см, толщиной базы *d* = 0.3 мм, с защитным покрытием на фронтальной поверхности из плавленого кварца толщиной $\delta = 0.3$ мм и бесконечно толстой защитой с тыльной стороны; использовался метод эквивалентных потоков [7, 9].



Рис. 2. Зависимость спада нормированной мощности $P(t)/P_0$ кремниевых СБ от времени из-за радиационной электризации и загрязнения защитных стекол: квадратики — результаты измерений на стенде ИТМ, точка — данные [42], темный треугольник — [36], ромбик — [3], штрихи — данные [23], кривая 1 — аппроксимация (3) при $\xi = 0.9$ и $\eta = 1.5$ (радиационная электризация), кривая 2 — аппроксимация (3) при $\xi = 0.94$ и $\eta = 4.59$ (загрязнение)

Кривая *1* на рис. 1, *а* с погрешностью не более 0.5 % соответствует аппроксимации из [14]

$$P(t)/P_0 = \xi + (1 - \xi) \exp(-t/\eta)$$
(3)

для значений $\xi = 0.875$, $\eta = 4.3$.

На рис. 1, *а* (кривая 2) приведены также результаты исследований влияния термоциклирования на спад электрической мощности кремниевых СБ на геостационарной орбите (GEO) от времени эксплуатации и от количества термоциклов *N* в вакууме.

Одним из основных поражающих факторов на геостационарной орбите является радиационная электризация СБ — радиационно-стимулированные пробои с выбросом заряда в окружающее пространство, разрушением и загрязнением защитных стекол. Механизмы пробоев радиационно-заряженных защитных стекол СБ (плавленый кварц, стекло К-208, К-215 и т. д.) детально описаны в работах [1, 2, 17, 20, 31].

В экспериментальных исследованиях на плазмодинамическом стенде Института технической механики использовался образец фрагмента односторонней панели СБ размером 10×12 см (солнечные элементы, основание из углепластика и сот алюминия [20]). Влияние радиационной электризации при облучении СБ высокоэнергичными электронами с энергией $3 \le W_{eh} \le$ ≤ 35 кэВ иллюстрируют данные рис. 2. Продукты газовыделения, сублимации и деструкции органических и композитных материалов наружных поверхностей КА и обшивок СБ, образующиеся под воздействием ионизирующего излучения, термоциклирования и радиационной электризации, адсорбируются на поверхности защитных стекол солнечных батарей. Ультрафиолетовое излучение активирует и стимулирует фотохимические реакции и процессы полимеризации компонентов загрязнения на поверхности защитных стекол. Результатом такого воздействия является образование устойчивых пленок и покрытий на поверхности защит-



Рис. 3. *а* — зависимость интегрального коэффициента $\Delta \alpha_s$ поглощения солнечного излучения защитного покрытия СБ (плавленый кварц) от времени эксплуатации *t* (кривая *1* — значения, рекомендуемые для GEO, *2* — расчет для KA Global Positioning System (GPS, 1/2 GEO) [34]), *б* — зависимость нормированной мощности *P*/*P*₀ и коэффициента $\Delta \alpha_s$ от толщины слоя загрязнения *l*_k (кривая *1* — зависимость $\Delta \alpha_s(I_k)$ [45], *2* — *P*(*l*_k)/*P*₀ для солнечного элемента *p*-кремний с удельным сопротивлением $\rho = 2$ Ом см с защитным покрытием из плавленого кварца толщиной $\delta = 0.3$ мм [45])

ных стекол, изменение их оптических свойств, уменьшение потока света, поступающего непосредственно на фотопреобразователь солнечного элемента, и, как следствие, — снижение электрической мощности СБ [26, 34].

Для оценки изменения электрической мощности кремниевых СБ при наличии слоя загрязнения на защитном стекле на GEO использовались следующие зависимости:

• изменение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения защитного покрытия из плавленого кварца от времени $\Delta \alpha_s(t) = \alpha_s - \alpha_{0s}$, (кривая *l* рис. 3, *a*), где α_{0s} — начальное значение;

• изменение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения плавленого кварца от толщины слоя загрязнения l_k на поверхности защитного стекла (кривая l рис. 3, δ) [45];

• изменение нормированной мощности СБ $P(l_k)/P_0$ от l_k для солнечных элементов из *p*-кремния с удельным сопротивлением $\rho = 2$ Ом · см и защитным покрытием из плавленого кварца толщиной $\delta = 0.3$ мм (кривая 2 рис. 3, δ) [45].

Учитывая, что в диапазоне $2 \le \rho \le 10$ Ом · см влияние удельного сопротивления на спад электрической мощности солнечного элемента из *p*-кремния сказывается только при флюенсах электронов с энергией 1 МэВ $F_e > 5 \cdot 10^{14}$ см⁻² (т. е. t > 15 лет на GEO) [7] приведенные зависимости могут быть использованы для оценки потерь мощности СБ с удельным сопротивлением $2 \le \rho \le 10$ Ом · см при $F_e \le 5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Зависимость $P(t)/P_0$, иллюстрирующая влияние загрязнения защитных стекол на спад мощности кремниевых СБ на GEO, представлена кривой 2 на рис. 2. Эта зависимость с погрешностью до 0.5 % соответствует аппроксимации (3) при $\xi = 0.94$ и $\eta = 4.59$.

Изменение электрической мощности СБ на орбите — результат интегрального воздействия околоспутниковой среды. На рис. 4 приведены кривые, характеризующие влияние отдельных факторов (термоциклирование, загрязнение, электризация, ионизирующее излучение) и интегрального воздействия околоспутниковой среды на GEO на изменение мощности кремниевых СБ с защитным стеклом из плавленого кварца



Рис. 4. Изменение нормированной мощности $P(t)/P_0$ кремниевых СБ при длительном воздействии факторов околоспутниковой среды на GEO: кривая 1 — термоциклирование, 2 — загрязнение защитных стекол, 3 ионизирующее излучение, 4 — электризация, 5 — интегральное воздействие околоспутниковой среды, расчет по формуле (1), квадратики — ИСЗ серии «Intelsat-II» [12], кружки — ИСЗ IDSCS-II (по минимуму тока короткого замыкания [16]), светлые ромбики — стендовые испытания [7, 28], крестики — ИСЗ ATS-6 [7], темные ромбики — ИСЗ LES-6 [7], точка — оценка [16], темный треугольник — ATS-5 [7], звездочки — ИСЗ «Intelsat-I» [7, 12] (штрихи соответствуют предельным значениям для части незащищенной поверхности СБ от 0.2 до 5.6 %), светлые треугольники — оценка [32]

толщиной $\delta = 0.3$ мм. Интегральная зависимость $P_{\Sigma}(t)/P_0$ (кривая 5 рис. 4), полученная линейным суммированием по формуле (1) результатов воздействия отдельных факторов (кривые 1-4 рис. 4), соответствует данным стендовых и спутниковых измерений [7, 12, 16, 28, 32]. При расчетах значений $P_{\Sigma}(t)/P_0$ принимались значения $k_{ru} \approx 0.65$, $k_{su} \approx 0.69$.

Высокая круговая орбита КА GPS (1/2 GEO). Параметры орбиты КА GPS (Global Positioning System): высота $h \approx 20\,000$ км, наклонение $\theta \approx 55^{\circ}$. На рис. 5 представлена расчетная зависимость мощности $P_{\Sigma}(t)/P_0$ кремниевых СБ космических аппаратов GPS при суммарном воздействии трех факторов: загрязнения защитных стекол из плавленого кварца толщиной $\delta = 0.15$ мм, ионизирующего излучения и термоциклирования, согласующаяся с результатами спутниковых измерений [44]. Кривая 1 рис. 5 получена



Рис. 5. Зависимость нормированной мощности $P(t)/P_0$ КА GPS от времени *t* из-за влияния факторов околоспутниковой среды на высокой круговой орбите (1/2 GEO): кривая 1 — влияние загрязнения защитных стекол CБ, 2 — влияние ионизирующего излучения на кремниевые СБ блока II A GPS из [45], 3 — интегральное воздействие околоспутниковой среды (расчет по формуле (1)), кружки — измерения для GPS блока II КА 13—17, кружки блок II КА 18—21, темные квадратики — блок II-A КА 22—40, светлые квадратики — блок I КА 1—6

с использованием зависимости $\Delta \alpha_s(t)$ (рис. 3, *a*, кривая 2) и зависимостей $\Delta \alpha_s(l_k)$ и $P(l_k)/P_0$ (рис. 3, δ); кривая 2 на рис. 5 — расчетные значения $P(t)/P_0$ влияния ионизирующего излучения на кремниевые СБ блока II A GPS из [44]. Интегральная энергетическая характеристика мощности СБ (кривая 3 рис. 5) получена линейным суммированием значений кривых 1, 2 рис. 5 и кривой 3 рис. 1, *a* ($k_{ru} \approx 0.65$) по формуле (1). Экспериментальные значения мощности СБ из работы [44] нормировались на величину начальной мощности.

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ИЗ-ЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ СРЕДЫ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Круговая солнечно-синхронная орбита (высота $h \approx 800 \text{ км}$, наклонение $\theta \ge 90^\circ$). С каждым годом число спутников на солнечно-синхронной орбите в полярной ионосфере возрастает. На круговой полярной орбите в разное время эксплуатировались: КА SPOT-1, -2 и -3 (Франция, ESA); микроспутник «Unisat-3» (Италия); малые спутники серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program, США), КА MSX (Midcourse Space Experiment, США) с космическим телескопом инфракрасного диапазона «Spirit-3» и др. [31, 39, 40, 47].

На рис. 6 (кривая *I*) приведены результаты наших расчетов (метод эквивалентных потоков) спада мощности $P(t)/P_0$ кремниевых солнечных батарей с толщиной защитного стекла $\delta =$ = 0.2 мм при воздействии ионизирующего излучения на орбите с параметрами $h \approx 800$ км, $\theta \ge$ $\ge 90^{\circ}$ (LEO). При расчетах, как и в работе [40], использовалась величина эквивалентного годового флюенса электронов с энергией 1 МэВ, равная $F_e \approx 3 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Зависимость $P(t) / P_0$, иллюстрирующая влияние загрязнения защитных стекол на спад мощности СБ на солнечно-синхронной орбите в полярной ионосфере показана на рис. 6 (кривая 2). При расчетах использовались зависимости толщины пленки загрязнения $l_{k}(t)$ на оптической поверхности от времени (кривая 2 рис. 7) и $P(l_{\nu})/P_{0}$ — кривая 2 рис. 3, б. Зависимость $l_{\nu}(t)$ на низкой орбите иллюстрирует рис. 7. Кривая 1 — результаты измерений на поверхности СБ космического аппарата MSX (высота $h \approx 903$ км, $\theta \approx 99.4^{\circ}$). Наша экстраполяция после 100 сут полета представлена кривой 2 на рис. 7. Рост толщины пленки загрязнения составил $\Delta l_{\mu} \approx$ ≈ 20 пм/сут [47]. Кривая 3 рис. 7 — экстраполяция для предельных уровней толщины пленки загрязнения (оптические поверхности МКС) при росте 13 нм/год [37].

Для спутников серии SPOT на солнечно-синхронной полярной орбите ($h \approx 800$ км, $\theta \approx 98^{\circ}$) годовое число термоциклов $N \approx 5100$ [38]. В таблице приведены результаты годовых измерений потерь мощности из-за термоциклирования кремниевых СБ космического аппарата SPOT-2 [31]. Среднегодовые потери мощности кремниевых СБ космического аппарата SPOT-2 составили 4.1 %. Эти результаты согласуются с данными, приведенными на рис. 1, δ .

К числу поражающих факторов околоспутниковой среды на солнечно-синхронной орбите в полярной ионосфере следует отнести также и воздействие высокоэнтальпийных потоков атомарного кислорода (AK) с энергией частиц более 5 эВ.

Условия проведения наших исследований влияния АК на изменение электрической мошности кремниевой СБ идентичны условиям, описанным в работе [18]. В сверхзвуковым потоке АК воздействию частиц подвержены поверхности защитного стекла и токопроводящих контактов из Ag, соединяющих солнечные элементы фрагмента панели СБ. Защитное стекло с добавкой церия К-208 (или плавленый кварц SiO₂) обладает высокой коррозийной стойкостью к воздействию высокоэнтальпийного потока АК, в частности к физическому распылению и химическому травлению. Кинетическая энергия потока АК существенно ниже энергии распыления большинства металлов (в частности серебра [6, 11, 15]). Основным механизмом воздействия АК на материал токопроводящих контактов СБ (Аg) является химическое травление и, как следствие, — образование оксидной пленки. При воздействии высокоэнтальпийного потока АК формируется сплошная пленка оксида Ад,О, для которой характерны линейная проводимость и положительный температурный коэффициент. В ходе испытаний регистрировались: изменение электрической мощности $\Delta P/P_0$ солнечного элемента и сопротивление $\Delta R/R_0$ токоподводящих контактов (R_0 — начальное сопротивление токоподводящего контакта). При измерениях температура проводящих слоев Ад, О изменялась от +10 до +40 °C. Максимальная толщина оксидной пленки при $F_{\Omega^+} \ge 10^{19} \, \mathrm{cm^{-2}}$ и температуре токоподвода +25 °С составляла 0.8-1.2 мкм на фронтальной стороне контакта и 0.5 мкм — на тыльной (подветренной) стороне. Эти данные согласуются с результатами измерений в работе [33]. Зависимость изменения $\Delta R/R_0$ от флюенса F_{Ω^+} атомарного кислорода иллюстрирует рис. 8. Следствием увеличения толщины, сопротивления токоподводящих контактов является уменьшение электрической мощности СБ. Годовой флюенс АК на солнечно-синхронной орбите КА серии SPOT при средней солнечной активности согласно [27] составляет 6 · 10¹⁸ см⁻².

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3



Рис. 6. Изменение нормированной мощности $P(t)/P_0$ кремниевых СБ на солнечно-синхронной орбите из-за воздействия ионизирующего излучения, термоциклирования и загрязнения защитных стекол: кривая 1 — ионизирующее излучение на LEO, 2 — загрязнение защитных стекол, 3 — наш расчет по формуле (1), крестики, квадратики, точки — данные SPOT-1, SPOT-2, SPOT-3 [28]



Рис. 7. Изменение толщины пленки загрязнения l_k на оптической поверхности во времени *t* на низкой орбите: 1 — измерения на поверхности солнечной батареи KA MSX после 100 дней полета [47], 2 — экстраполяция авторов для MSX, 3 — предельные уровни толщины пленки загрязнения на оптических поверхностях MKC [37]

Потери P_{π}/P мощности кремниевых солнечных батарей космического аппарата SPOT-2 из-за термоциклирования на полярной орбите

Дата	$\Delta P_{_{\mathrm{TII}}}/P,\%$	Дата	$\Delta P_{_{\rm TL}}/P,\%$
27.02.1997	4.4	06.10.1997	4.0
13.03.1997	4.2	27.10.1997	4.4
10.04.1997	4.3	01.12.1997	3.8
19.06.1997	4.6	05.01.1998	3.8
31.07.1997	4.0	02.02.1998	3.8
08.09.1997	3.9	04.03.1998	4.0



Рис. 8. Зависимость изменения $\Delta R/R_0$ сопротивления токоподводящего контакта от флюенса атомарного кислорода $F_{0:}$: крестики — измерения авторов при +25 °C, треугольник — измерения на KA «Intelsat-IV» [33]



Рис. 9. Потенциалы φ_W , измеренные на поверхности ИСЗ серии DMSP (F-6, F-7, F-13) в тени Земли в зависимости от концентрации положительных ионов в полярной ионосфере: крестики — данные F-6, косые крестики — F-7, точка — F-13, треугольник — данные [21, 25], 1 — граничная кривая

По результатам наших измерений электрическая мощность кремниевых СБ в пределах погрешности измерений (≤ 0.5 %) из-за воздействия высокоэнтальпийного потока АК с флюенсом $2 \cdot 10^{18} \leq F_{0^+} \leq 6 \cdot 10^{21}$ см⁻² практически не изменяется: влияние АК на изменение $\Delta P / P_0$ солнечных батарей спутников серии SPOT пренебрежимо мало.

В полярной ионосфере на высоте $h \approx 840$ км, $\theta \approx 90^{\circ}$ в тени Земли, когда интегральный поток авроральных электронов с энергиями не менее 10 кэВ превосходил 10⁸ см⁻²с⁻¹стер⁻¹, при плотности «холодной» ионосферной плазмы менее 10⁴ см⁻³ поверхности КА серии DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) заряжались до высоких отрицательных потенциалов (<-100 В) [25, 29]. За 12-летий период (1989—2001 гг.) на КА серии DMSP зарегистрировано 1253 акта высоковольтного заряжания [24]. Электризация диэлектрических поверхностей КА в полярной ионосфере в тени Земли, в отличие от магнитосферы, обусловлена суперпозицией двух воздействий: облучение высокоэнергичными авроральными электронами и обтекание сверхзвуковым потоком положительных ионов «холодной» ионосферной плазмы. Концентрация положительных ионов низкотемпературной плазмы n_i , способной эффективно нейтрализовать высоковольтные заряды без инициирования радиационно-стимулированных пробоев, определяется из баланса токов на поверхности диэлектрика. Для полярной ионосферы в тени Земли при плотности тока авроральных электронов с энергией более 10 кэВ $j_{eh} \le 10$ нА/см²; $n_i^{\text{max}} \approx 10^5$ см⁻³ [21, 25]. Условие $n_i \ge 10^5$ см⁻³ определяет концентрацию ионов потока плазмы, способную стимулировать пробой радиационно-заряженной СБ. Пробой сопровождается электромагнитными шумами ВЧ-диапазона, распылением защитных стекол и разрушением фотопреобразователей. Уменьшение электрической мощности и тока короткого замыкания СБ при этом обусловлено загрязнением, вызванным пробоями. При концентрации «холодной» плазмы $n_i <$ < 10⁵ см⁻³ происходит «мягкая» (без пробоев) нейтрализация высоковольтных зарядов на поверхности СБ [20]. Уровни заряжания (потенциалы), измеренные на поверхности ИСЗ серии DMSP (F-6, -7, -13) в тени Земли в зависимости от концентрации положительных ионов в полярной ионосфере иллюстрирует рис. 9. При плотности тока авроральных электронов $j_{eh} \approx$ ≈ 10 нА/см² (с энергией более 14 кэВ) и концентрации ионов $n_i < 100 \text{ см}^{-3}$ на поверхностях КА серии DMSP накапливаются отрицательные потенциалы $-\varphi_W \ge 200 \text{ B}$, при которых возможно формирование электрических разрядов и пробоев [41, 46].

Частота электрических пробоев на ИСЗ серии DMSP коррелирует с числом солнечных пятен и уменьшением концентрации положительных ионов в «холодной» ионосферной плазме. Рис. 10 иллюстрирует характер изменения концентрации положительных ионов на орбите КА серии DMSP за период 1989—2001 гг., измеренной на ИСЗ F-8 ... -14 в северном и в южном полушариях на широтах от 65 до 75° [24]. Если предположить, что условия эксплуатации КА SPOT-1, -2, -3 (1986—1997 гг.) близки к условиям эксплуатации ИСЗ серии DMSP на полярной орбите до протонной вспышки на Солнце в 1996 г., то электризационно опасными являются условия в южном полушарии с 1995 г. по 1997 г. При $n_i \approx 100 \text{ см}^{-3}$ возможно возникновение низковольтных дуговых разрядов на поверхностях KA [4, 23, 24].

В диапазоне значений $-\varphi_W$ от 100 до 300 В на стеклах К-208 по оценкам [4, 23] при облучении электронами с энергией порядка 20 кэВ при плотности тока $j_{eh} \approx 10$ нА/см² число разрядных импульсов равно $v_d \leq 100$ в час. Согласно результатам испытаний работы [43, рис. 16] при $v_d \leq 100$ влиянием электрических пробоев и дуг на изменение мощности и тока короткого замыкания СБ можно пренебречь. Условия эксплуатации солнечных батарей КА серии SPOT-1, -2, -3 на полярной орбите близки к этим условиям [24].

Интегральные оценки спада мощности солнечных батарей показаны на рис. 6. Кривые 3, 4, 5 — результаты измерений на ИСЗ серии SPOT-1, -2 и -3, кривая 6 — расчетные значения зависимости $P_{\Sigma}(t)/P_0$, получены линейным суммированием (1) результатов воздействия трех факторов околоспутниковой среды: ионизирующего излучения (кривая 1), загрязнения (кривая 2) и термоциклирования при $k_{\pi \mu} \approx 0.65$. Расчетные значения (кривая 6) согласуются с результатами измерений на ИСЗ серии SPOT-1, -2 и -3 с погрешностью не более 0.5 %. Отклонение



Рис. 10. Изменение концентрации положительных ионов, измеренных на орбите KA серии DMSP за период 1989 — 2001 гг. [24] (1 — северное полушарие, 2 — южное полушарие): a - MC3 F-8, F-11, F-13; $\delta - MC3$ F-9, F-10, F-12, F-14

значений $P_{\Sigma}(t) / P_0$ для $t \approx 8$ и 9 лет обусловлены влиянием солнечной протонной вспышки при t = 7 лет (в 1996 г.) [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана расчетно-экспериментальная процедура прогноза оценки потерь электрической мощности кремниевых солнечных батарей космических аппаратов из-за воздействия околоспутниковой среды при длительной эксплуатации на круговых орбитах в полярной ионосфере и в магнитосфере Земли.

Определены зависимости спада мощности СБ, обусловленные влиянием отдельных факторов околоспутниковой среды.

Показано, что интегральные зависимости потерь мощности кремниевых солнечных батарей, полученные с учетом влияния отдельных факторов околоспутниковой среды, согласуются с результатами измерений на космических аппаратах серии SPOT в полярной ионосфере, на ИСЗ серии IDSCS, ATS; «Intelsat» и др. на геостационарной орбите в магнитосфере Земли, а также на орбите КА группировки GPS.

- Акишин А. И. Электроразрядное повреждение солнечных батарей космических аппаратов в магнитосферной и ионосферной плазме // Физика и химия обработки материалов. — 1995. — № 2. — С. 43—49.
- Акишин А. И., Тютрин Ю. И., Цепляев Л. И. Электроразрядный механизм повреждения солнечных батарей при электронном облучении // Физика и химия обработки материалов. — 1996. — № 6. — С. 56—59.
- Антонов В. М., Пономаренко А. Г. Лабораторные исследования эффектов электризации космических аппаратов. — Новосибирск: Наука, 1992. — 115 с.
- Бабкин Г. В., Гостищев Э. А., Смекалкин Л. Ф. и др. Условия возникновения низковольтных электрических дуг между элементами солнечных батарей при радиационной электризации космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 75—83.
- Ермоленко А. Ф. О проверке гипотезы линейного суммирования повреждений // Тр. Москов. энергетического ин-та. — 1974. — Вып. 185. — С. 52—54.
- Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. — М.: Мир, 1967. — 507 с.
- Крейнин Л. Б., Григорьева Г. М. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации // Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Исследование космического пространства. — 1979. — Вып. 3. — 128 с.
- Куликов И. А., Куприй А. А., Юрлова Г. А. Экспериментальные исследования воздействия факторов космического пространства на долговечность углепластиков // Физика и химия обработки материалов. 1993. № 4. С. 38—46.
- Летин В. А. Функционирование солнечных батарей в космической среде // Модель космоса: В 2 т. — М.: Книжный дом Университет, 2007. — Т. 2. — С. 561—594.
- Летин В. А., Заявлин В. Р., Еремин П. А. Комплексное воздействие факторов космического пространства при термовакуумных испытаниях солнечных батарей // Космич. исслед. — 1999. — 37, № 3. — С. 329—331.
- 11. *Мак-Даниель И*. Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: Мир, 1967. 832 с.
- 12. *Модель* космоса-82 / Под ред. Н . С. Вернова: В 2 т. М.: МГУ, 1983. Т. 2. 770 с.
- 13. *Переверзев Е. С.* Модели накопления повреждений в задачах долговечности. Киев: Наук. думка, 1995. 360 с.
- 14. *Присняков В. Ф.* К вопросу деградации солнечных батарей на космических аппаратах // Космічна наука і технологія. — 1996. — **2**, № 1/2. — С. 73—81.
- Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: В 2 т. / Под ред. Р. Бериша. — М.: Мир, 1986. — Т. 2. — 488 с.
- Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

- 17. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Губин В. В., Токмак Н. А. Потери мощности солнечных батарей под воздействием околоспутниковой среды на геостационарной орбите // Космич. исслед. — 2005. — 43, № 4. — С. 274—282.
- Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Изменение свойств материалов панелей солнечных батарей КА под воздействием атомарного кислорода // Космич. исслед. — 2007. — 45, № 4. — С. 294—304.
- Шувалов В. А., Приймак А. И., Бандель К. А., Кочубей Г. С. Перенос зарядов быстрыми электронами на подветренные поверхности твердого тела в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы // Прикладная механика и техническая физика. — 2008. — 49, № 1. — С. 13—23.
- 20. Шувалов В. А., Приймак А. И., Губин В. В. Радиационная электризация элементов конструкций космических аппаратов. Физическое моделирование, накопление и нейтрализация заряда // Космич. исслед. — 2001. — **39**, № 1. — С. 18—26.
- Шувалов В. А., Приймак А. И., Губин В. В. и др. Газоразрядный источник плазмы для модификации потенциала на поверхности диэлектрика // Приборы и техника эксперимента. — 2002. — 45, № 2. — С. 141—144.
- 22. Ягушкин Н. И., Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. Радиационно—электрические явления в диэлектрических материалах космических аппаратов при электризации // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — 1989. — Вып. 86. — С. 131—168.
- 23. Ягушкин Н. И., Сергеев А. И., Гостищев Э. А. Исследование радиационно-электрических процессов в диэлектриках при облучении электронами с энергиями до 100 кэВ // Модель космоса: В 2 т. М: Книжный дом Университет, 2007. Т. 2. С. 341—360.
- Anderson P. C. Survey of spacecraft charging events of the DMSP spacecraft in LEO // Proc. 7-th Spacecraft Charging Technology Conf. — 2001. ESA Sp-476. — P. 331— 336.
- 25. *Anderson P. C., Koons H. C.* Spacecraft charging anomaly a low-altitude satellite in a Aurora // J. Spacecraft and Rockets. 1996. **33**, N 5. P. 734-738.
- Dever J. A., Bruckner E. J., Scheiman D. A. Contamination of space environmental effects on solar cells and thermal control surfaces // J. Spacecraft and Rockets. - 1995. -32, N 5. - P. 832-838.
- 27. ECSS-E-10-04A. Space environment / ESA-ESTEC. Noordwijk, Netherlands, 2000. 219 p.
- Goldhammer J. G. Irradiation of solar cell candidates for the ATS-F solar cell experiment // 9-th IEEE Photovolt. Specialists Conf. – N.Y., 1972. – P. 316–328.
- Gussenhoven M. A., Hardy D. A., Rich F. High-level spacecraft charging in the low-altitude polar and auroral environment // J. Geophys. Res. — 1985. — 90A, N 11. — P. 11009—11023.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

- 30. Harris J. D, Anglin E. J., Hepp A. F., Balley S. G. Space environmental testing of dye-sensitized cells // Proc. 6-th European Space Power Conf. Porto, Portugal, 2002. N ESA SP–502. P. 702–711.
- 31. Jalinat A., Pcart G. Samson P. In-orbit behaviour of SPOT 1, 2 and 3 solar arrays // Proc. of the Fifth European Space Power Conf. — Tarragona, Spain, 1998. — N ESA SP– 416. — P. 627—631.
- 32. Jones P. A., White S. F., Harvey T. Y., Smith B. S. A high specific power solar array for low mid-power spacecraft // SPRAT XII: Proc. of the space photovoltaic research and technology conf. — NASA, 1992. — N NASA CP-3210. — P. 177—187.
- Koontz S., King G., Dunnet A., et al. Intelsat solar array coupon atomic oxigen fligt experiment // J. Spacecraft and Rockets. – 1994. – 31, N 3. – P. 475–481.
- Leet S. J., Fogdal L. B., Willkinson M. C. Thermooptical property degradation of irradiated spacecraft surfaces // J. Spacecraft and Rockets. – 1995. – 32, N 5. – P. 832–838.
- Letin V. A. Optical radiation and thermal cycling losses of power solar array returned orbital station «Mir» after 10,5 years of operation // Proc. 6-th European Space Power Conf. – Porto, Portugal, 2002. – N SP–502. – P. 713–718.
- 36. Letin V. A., Bordina N. M., Zayavlin V. R., Chernichkova T. S. An experimental simulation of space environment effects on the solar cell battery // Problems of spacecraft environment interaction: Int. Conf. — Irkutsk, 1992. — P. 110—112.
- Pippin H. G., Wol L. B., Loebs V. A., Bohnhoff-Hlavacek G. Contamination effects on the passive optical sample assembly experiments // J. Spacecraft and Rockets. – 2000. – 37, N 5. – P. 567–572.
- Remanry S., Serene F., Nabarra R. The THERME Experiment: in-flight measurement of the ageing of thermal controlcoating. // Proc. 9-th International Symp. on Materials in a space environment. Noordwijk: ESTEC, 2003. P. 585—587.
- Roussel J. F., Alet I., Fay D., Preira A. Effect of space environment on spacecraft surfaces in sun-synchronous orbits // J. Spacecraft and Rockets. — 2004. — 41, N 5. — P. 812—820.
- Santoni F., Piergentili F. Analysis of the Unisat-3 solar array in-orbit performance // J. Spacecraft and Rockets. 2008. 45, N 1. P. 142–148.

- Soldi J. D., Yasting D. E., Hardy D., et al. Flight data analysis for the photovoltaic array space power plus diagnostics experiment // J. Spacecraft and Rockets. 1997. 34, N 1. P. 92-103.
- Tarasov V. N., Babkin G. V., Morosov E. P. Electrostatic behaviour of solar-cell batteries under condition of radiation electrization // Problems of spacecraft environment interaction: Int. Conf. – Irkutsk, 1992. – P. 58–59.
- 43. Toyoda K., Matsumoto T., Cho M., et al. Power reduction of solar arrays by arcing under simulated geosynchronous orbit environment // J. Spacecraft and Rockets. 2004. 41, N 5. P. 854-861.
- Tribble A. C. Revised estimates of photochemically deposited contamination on the GPS satellites // J. Spacecraft and Rockets. – 1998. – 35, N 1. – P. 114–116.
- Tribble A. C., Boyadjian B., Davis J. Contamination control engineering design guidelines for aerospace community // NASA Contractor Report. — 1996. — N 4740. — 126 p.
- Upschulte B. L., Marinelli W. J., Carleton K. L., et al. Arcing of negatively biased solar cells in a plasma environment // J. Spacecraft and Rockets. — 1994. — 31, N 3. — P. 493—507.
- Wood B. E., Hall D. F., Lesmo J. C. Midcourse space experiment satellite flight measurements of contaminants on quartz crystal microbalances // J. Spacecraft and Rockets. 1998. 35, N 4. P. 533–538.

Надійшла до редакції 07.02.11

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

POWER LOSSES FOR SOLAR ARRAYS OF A SPACECRAFT IN THE EARTH'S POLAR IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE

We developed a calculating-experimental procedure for the forecast of electrical power losses of spacecraft silicon solar arrays during long-term operation in circular orbits within the Earth's polar ionosphere and magnetosphere. Power losses of solar arrays due to the effect of individual factors of the environment around a spacecraft are determined. It is shown that integral values for power losses of solar arrays, with consideration for the effect of individual factors of the environment around a spacecraft, agree with satellite measurement results. УДК 520.8

Д. А. Шелковенков

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ ОСТАVА_РРА

Розглянуто принципи побудови та функціонування універсального програмно-алгоритмічного комплексу OCTAVA_PPA, який створено з метою виконання попередньої післясеансної обробки спостережень глобальних супутникових навігаційних систем (ГНСС). Представлено методичну та алгоритмічну основу комплексу, його функціональні можливості і характеристики. Описано вдосконалення комплексу, реалізовані у 2009—2010 рр. Стисло викладені плани подальшого розвитку та впровадження.

введение

Создание отечественного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) точного позиционирования в послесеансном режиме обработки ГНСС-наблюдений, впоследствии получившего условное название ОСТАVА, было начато в 2002 г. в Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО) под руководством академика Я. С. Яцкива. Разработка была начата с создания базового комплекса алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, необходимых для выполнения предварительных обязательных операций, предшествующих основным процедурам позиционирования (сглаживание наблюдений, разрешение фазовой неоднозначности, непосредственное позиционирование, верификация решения, оценка его точности и др.). Совокупности таких предварительных операций в специализированной литературе получили название «предварительной обработки и анализа» (PPA), подразумевающее определенный набор операций обработки т. н. «сырых» ГНСС-

данных. В частности, отдельный ПАК предварительной обработки ГНСС-наблюдений, получивший условное название ОСТАVA_РРА, предназначен для выполнения следующих основных операций:

• преобразования входных данных к внутреннему формату с одновременным контролем входных данных на соответствие используемым форматам;

• контроль и обеспечение качества наблюдений (устранение аномалий, контроль уровня шума и многолучевости, скорости дрейфа опорного генератора приёмника и т. д.) и эфемеридно-временной информации спутников ГНСС;

• поиск, оценка и устранение циклических/ полуциклических фазовых скачков одночастотных или двухчастотных ГНСС-наблюдений;

• коррекция временных шкал приемников, контроль геометрических условий наблюдений и параметров качества решения навигационной задачи и др.;

• анализ результатов предварительной обработки данных и визуализация контрольных параметров с выводом о пригодности наблюдений к дальнейшей обработке.

[©] Д. А. ШЕЛКОВЕНКОВ, 2011

В 2004 г. была сформирована алгоритмическая основа ПАК ОСТАVА РРА, ключевой составляющей которого была совокупность алгоритмических и программных модулей обработки фазовых наблюдений [12, 13]. В 2005-2008 гг. были завершены разработка и тестирование первой автоматизированной версии программного обеспечения ОСТАVA PPA [2, 4, 6, 8, 14], в состав которой были введены новые составляющие (контроль качества наблюдений, поиск и устранение аномальных наблюдений, контроль качества эфемеридно-временных параметров спутников и др.), а также внесено множество усовершенствований и дополнений в совокупности модулей устранения фазовых скачков, оценки уровня многолучевости, решения навигационной задачи, отображения выходной информации и др. Это стало возможным благодаря тестированию и эксплуатации программного комплекса в течение нескольких лет с использованием огромного количества сессий наблюдений ГНСС-оборудования практически всех ведущих мировых производителей.

В то же время в ходе тестирования, доработок и практической эксплуатации ПАК выяснилось, что созданный комплекс не свободен от ряда недостатков, имеет ограничения функциональных возможностей (например, обработке подвергаются только GPS-наблюдения, а наблюдения ГЛОНАСС не включены в обработку), установлены недостатки программной реализации комплекса, ограничивающие возможности вычислительного процесса — быстродействие, объем используемой памяти, ограничения принятых форматов выходных данных и др. Это привело к необходимости пересмотра ряда программных решений, изменения концепции организации вычислений, необходимости оптимизации ряда важнейших программных модулей и расширения функциональных возможностей ПАК. В 2009—2010 гг. была выполнена новая разработка (вторая версия ПАК), позволившая значительно расширить его функциональные возможности и устранить множество недостатков программной реализации комплекса.

Целью настоящей работы является изложение принципов построения и функционирования

отечественного комплекса ОСТАVA_PPA, предназначенного для предварительной послесеансной обработки ГНСС-наблюдений, описание усовершенствований ПАК, а также направлений его внедрения и дальнейшего развития.

МЕТОДИЧЕСКАЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА

На начальном этапе разработки OCTAVA_PPA исследовательским коллективом был принят ряд положений, определивших состав разработанных методов обработки и реализованных алгоритмов. Эти положения могут быть сформулированы следующим образом:

• разработка должна быть направлена на подготовку данных для применения к ним алгоритмов позиционирования, а не только оценку качества наблюдений, как это реализовано, например, в TEQC [10] и подобным ему;

• разрабатываемые методы и алгоритмы должны предусматривать возможность скорее исправления аномалий, а не их удаления из дальнейшей разработки — минимизация отбракованных данных и ложных тревог;

• разрабатываемые методы должны предусматривать возможность обработки одночастотных ГНСС-наблюдений с использованием тех же принципов, что и для двухчастотных данных;

• разрабатываемые методы должны быть применимы без использования дифференциального подхода обработки;

• должна быть предусмотрена возможность получения широкого спектра качественных характеристик о первичных наблюдениях.

На основе принятых постулатов, анализа доступной литературы и полученного опыта обработки наблюдений ГНСС-приёмников различных классов и производителей, было установлено, что для получения данных с наилучшим качеством должны быть выполнены следующие операции [14].

Чтение текстовых либо бинарных форматов, принятых для обмена ГНСС-информацией, таких как RINEX (ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211. txt), IONEX (ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/ format/ionex1.ps), SP3 (http://igscb.jpl.nasa.gov/ igscb/data/format/sp3_docu.txt) и т. д. Решение данной задачи может показаться очевидным и простым, так как чаще всего стандарт, описывающий формат файла, доступен разработчикам для детального изучения и распространяется свободно. Однако опытным путём было установлено, что, например, реализация программного обеспечения для формирования файлов в широко распространённом на данный момент формате для обмена первичными наблюдениями RINEX версии 2.11 могут значительно отличаться, что приводит к значительным затруднениям при создании универсального алгоритма для чтения файлов. Кроме того, ошибки в данных и программном обеспечении могут приводить к тому, что какой-либо файл может не соответствовать стандарту, что требует принятия адекватных действий (например, отказа от дальнейшей обработки файла или пропуска некорректных строк в файле).

Проверка целостности данных. Как показывает практика, после считывания данных из файлов важно получить информацию о соответствии задекларированного и фактического количества отсчётов, а также правильности следования временных отсчётов. Наиболее частой проблемой при выполнении контроля целостности данных является отсутствие одной или более временных эпох.

Значительно реже встречаются такие проблемы, как внезапное изменение темпа следования наблюдений, запись в файл двух или более эпох с одинаковыми временными метками или нарушение последовательности течения времени. Такие проблемы обычно вызваны ошибками в работе аппаратуры и/или программного обеспечения.

Обнаружение аномалий кодовых наблюдений. Экспериментальные исследования, проведенные автором с использованием более 1000 сессий измерений, показали, что наиболее эффективным методом обнаружения аномалий кодовых наблюдений, таких как спонтанные выбросы, могут эффективно обнаруживаться и устраняться при решении классической навигационной задачи в автономном режиме с применением RAIM-подобного (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) [11] алгоритма контроля целостности рабочего созвездия, предложенного автором в работах [2, 6, 8, 14]. Экспериментально доказано также, что предложенный алгоритм позволяет обнаруживать не только аномальные значения в кодовых наблюдениях, но и сбои, обусловленные ошибками в навигационных сообщениях спутников связанных, например, с орбитальными манёврами либо перенастройкой бортового опорного генератора.

Кроме того, результат решения навигационной задачи позволяет сформировать временной ряд оценок ошибок часов приёмной аппаратуры, что необходимо для дальнейшей обработки.

Коррекция шкалы времени. Известно, что при применении дифференциального метода определения местоположения наблюдения двух или более пунктов должны выполняться синхронно [1]. При этом подавляющее большинство приёмной аппаратуры ГНСС содержит в себе кварцевый опорный генератор. Производители аппаратуры могут реализовывать две принципиально различные схемы управления опорным генератором: с непрерывной подстройкой и с пороговой подстройкой.

В случае схемы с непрерывной подстройкой ошибка часов приёмника относительно системной шкалы времени навигационной системы оценивается непрерывно, обычно один раз в секунду. Подстройка опорного генератора выполняется так, чтобы минимизировать ошибку. Так как ошибка показаний часов опорного генератора является одним из оцениваемых в навигационной задаче параметров, то погрешность синхронизации примерно соответствует погрешностям определения пространственных координат. В настоящее время эти погрешности составляют 3-6 м СКО для условий открытого неба, или 10-20 нс во временном эквиваленте. Можно показать, что исходя из радиальной скорости движения навигационных спутников около 4 км/с такой уровень погрешностей вполне приемлем.

В случае пороговой подстройки ошибка часов приёмника нарастает пропорционально долговременной нестабильности опорного генератора. Подстройка опорного генератора выполняется в том случае, если оценка расхождения шкал времени приёмника и системной шкалы превысит определённый порог, обычно 1 или 0.5 мс. Обработка наблюдений таких приёмников требует выполнения процедуры синхронизации часов приёмника с учётом возможности появления скачков шкалы времени, обусловленных выполненными в приёмнике подстройками. Эксперименты показали, что в данном случае после предварительной обработки достижимы погрешности не хуже, чем для приёмников с непрерывной подстройкой.

Обнаружение аномалий фазовых наблюдений. Целью данного этапа обработки является обнаружение моментов времени, для которых в фазовых наблюдениях одного или нескольких навигационных спутников наблюдается отклонение от общепринятой модели наблюдений [1]. Обычно причинами таких отклонений являются воздействие электромагнитных помех либо низкий уровень принимаемого сигнала, что приводит к многочисленным сбоям в работе схем слежения за фазой несущей сигнала.

Основным на данном этапе является анализ временных рядов, полученных путём формирования разностей значений двух соседних временных отсчётов (приращения) линейной комбинации (ЛК) наблюдений, полученной путём вычитания оценок фазовых псевдодальностей из кодовых. Применение таких ЛК для обнаружения фазовых циклических скачков подробно изложено в работе [9]. Однако, как показали исследования, кодово-фазовые ЛК имеют значительные ограничения, обусловленные тем, что уровень шумовых и многолучёвых составляющих погрешностей кодовых псевдодальностей могут на порядок и более превышать длину волны несущей навигационного сигнала. Поэтому данный метод в ПАК ОСТАVА РРА применяется лишь для обнаружения моментов появления выбросов в фазовых наблюдениях, величина которых превышает в 3-5 раз уровень шумовых и многолучёвых погрешностей кодовых наблюдений.

После составления таблицы, в которой отмечаются все обнаруженные выбросы, проводится её анализ с целью обнаружения характерных для воздействия помех ситуаций по следующим критериям:

• наличие выбросов для 50 % и более навигационных спутников в один и тот же момент времени; • наличие выбросов для одного и того же навигационного спутника в течение трех и более последовательных временных отсчётов.

Обнаруженные по этим критериям наблюдения исключаются из дальнейшей обработки, а сформированная таблица может быть использована в дальнейшей обработке с целью предсказания моментов появления фазовых циклических скачков.

Обнаружение, оценка и коррекция фазовых скачков. Важной особенностью ОСТАVА РРА является возможность восстановления непрерывности фазовых наблюдений. Непрерывность слежения за сигналом может нарушаться вследствие затенения приёмной антенны, низкого соотношения сигнал/шум или иных причин, что, в свою очередь, приводит к ошибкам вычислений целочисленной составляющей фазовых псевдодальностей. Предложенный в работе [13] метод коррекции фазовых циклических скачков с использованием анализа разностей фазовых псевдодальностей между спутниками одного приёмника показал высокую эффективность и точность оценок скачков по сравнению с известными ранее методами, а также возможность его использования для одночастотных наблюдений. Однако в ходе экспериментальных исследований был установлен ряд особенностей и ограничений данного метода, обусловленных особенностями схемных реализаций схем слежения за фазой несущей сигналов навигационных спутников и спектральным составом погрешностей фазовых псевдодальностей.

Во-первых, было установлено, что в случае слежения за сигналом с предельно низкими значениями соотношения сигнал/шум в приёмниках большинства производителей могут возникать ошибки, приводящие к нарушению целочисленной природы фазовых неоднозначностей, а именно — возникновению полуциклических скачков с последующим восстановлением полных циклов в течение 10—12 с. Возможность оценки полуциклических скачков была доказана экспериментально путём изменения значений порогов обнаружения и допусков оценки скачка. Однако надёжная коррекция таких скачков представляется проблематичной, так как появление полуциклических фазовых скачков часто сопровождается срывами слежения за сигналом. Вследствие этого возможны ошибочные коррекции, что в некоторых случаях может привести к невозможности дальнейшего разрешения фазовых неоднозначностей.

Во-вторых, в ходе экспериментальных исследований был выявлен эффект, обусловленный инерционностью цепей слежения за фазой несущей сигнала и проявляющийся в виде возникновения дополнительной медленно изменяющейся составляющей в фазовых наблюдениях в случае резкого изменения уровня сигнала на входе приёмника. Это может быть обусловлено внезапным возникновением затеняющих радиосигнал от навигационного спутника препятствий, таких как металлические опоры антенн, деревья и т. п., вследствие движения спутника или приёмной антенны. Величина такого изменения может достигать 5...10 см за 2...10 с, что сравнимо с длиной волны несущей сигнала (для системы GPS длина волны на частоте L1 составляет 19 см), после чего обычно возникает срыв слежения за сигналом. В некоторых источниках такой эффект получил название «last value slip», однако подобные искажения измерений фазы более точно назвать как «динамические погрешности фазовых наблюдений». Основной проблемой таких искажений является то, что они могут приводить к появлению ложных тревог в процессе обнаружения и оценки величины скачков. С другой стороны, с учётом того, что величина такой динамической погрешности (фактически изменения в течении 2-10 с) не превышает половины длины волны, имеется возможность идентификации указанных искажений (обычно на краях разрыва слежения и пропусков кинематических наблюдений) и их парирования в ходе дальнейшей обработки.

В третьих, экспериментально было установлено, что в случае наблюдений с интервалами 10— 30 с между соседними отсчётами времени (изначально метод восстановления непрерывности фазовых наблюдений применялся для данных с интервалами 1—5 с) надёжная оценка величин фазовых циклических скачков невозможна, что обусловлено спектральными характеристиками опорных генераторов навигационных спутников. Решением данной проблемы стало использование т.н. двойных разностей фазовых наблюдений (разность разностей фазовых псевдодальностей двух спутников двух синхронно работающих приёмников), что позволило в значительной степени устранить влияние опорных генераторов спутников [3]. Применение данного метода восстановления непрерывности фазовых наблюдений предполагает отсутствие разрывов в рядах координат навигационных спутников. Применение традиционных алгоритмов, описанных в интерфейсных контрольных документах на навигационные системы, может приводить к скачкообразным изменениям расчётных значений от единиц до десятков метров при смене наборов текущих эфемерид. Решение проблемы было найдено в использовании бортовой эфемеридной информации, формируемой центрами IGS (International GNSS Servise) (https:// www.ngs.noaa.gov/IGSWorkshop2008/docs/igs08acs+products.ppt), так как они содержат все наборы, сформированные каждым спутником за сутки, а не только ту информацию, которую зафиксировал навигационный приёмник на интервалах радиовидимости. Также было применено взвешенное усреднение результатов расчётов координат спутника и поправок к показаниям его часов с использованием нескольких (5-6) наборов эфемеридной информации с наименьшим удалением на шкале времени от момента излучения сигнала. Данный подход позволил достичь величины скачков 1-2 мм, что на два порядка меньше порога обнаружения фазовых циклических скачков.

Оценка приращений координат с использованием фазовых наблюдений. Ещё одним ограничением описанного выше метода обнаружения и устранения фазовых циклических скачков является то, что он был разработан в предположении неподвижности приёмной антенны. Для применения данного метода к наблюдениям движущегося приёмника (пешеход, автомобиль, летательный аппарат и т. п.) потребовалось создать метод, позволяющий оценить изменения координат приёмной антенны с погрешностями 1– 2 см с использованием фазовых наблюдений. Математическая основа решения задачи оценки приращения координат по псевдодальностям для случая непрерывных наблюдений известна [7], поэтому основные усилия были направлены на разработку метода надёжного обнаружения фазовых циклических скачков. Наиболее эффективным по критерию минимизации ложных тревог оказался метод, который комбинирует информацию из таблицы о моментах возникновения скачков, сформированной ранее в ходе обнаружения аномалий фазовых наблюдений, с RAIM-подобным алгоритмом, разработанным и использовавшимся ранее для обнаружения аномалий кодовых наблюдений.

Кроме формирования опорной информации для восстановления непрерывности фазовых наблюдений, полученная информация может служить для автоматизированной идентификации участков сеанса наблюдений, во время которых навигационный приёмник находился в движении. Это, в свою очередь, может быть использовано для автоматической разметки сеансов в режиме «stop-and-go», что значительно сокращает трудоёмкость обработки таких файлов в случае отсутствия аппаратной возможности маркировки при выполнении наблюдений и значительном объёме пунктов стояния (10 и более).

Оценка уровня шумовых и многолучевых погрешностей. Такие характеристики кодовых наблюдений, как оценки уровня шумовых (некоррелированных) и многолучёвых (коррелированных и обусловленных многопутностью распространения сигнала) погрешностей, могут дать специалисту важную информацию о характеристиках приёмной антенны, правильности выбора места для установки антенного поста, качестве антенного кабеля и косвенные оценки о качестве наблюдений для данного сеанса в целом. В ОСТАVА РРА реализованы методы для раздельной оценки шумовых и многолучевых погрешностей кодовых наблюдений [3], которые могут быть использованы для формирования графической информации, а также служить параметрами для отсечения из измерительного сеанса данных, не удовлетворяющих заданным критериям (например, по максимально допустимому уровню многолучевости).

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Методы и алгоритмы ПАК ОСТАVA_РРА реализованы в виде программ в среде программирования MatLab, выбор которого был обусловлен наличием богатой библиотеки функций для выполнения матричных операций, относительно высокой скоростью работы и наличием простой и удобной среды разработки. Это делает возможным создавать достаточно сложные программные комплексы усилиями людей, не имеющих специальных углублённых знаний в области программирования.

Изначально целью реализации разрабатываемых алгоритмов являлась проверка их правильности и исследование их свойств. Позже, в 2005 г., было принято решение о создании комплекса программных модулей, реализующего последовательно все разработанные методы и алгоритмы. К 2007 г. был создан комплекс программ [4], представляющий собой библиотеку функций и набора программ, для следующих типов входных данных:

• наблюдения неподвижных пунктов с интервалам между отсчётами наблюдений от 1 до 5 с (OCTAVA PPA Static 1-1/5Hz);

• наблюдения неподвижных пунктов с интервалам между отсчётами наблюдений от 10 до 30 с (OCTAVA_PPA_Static 1/5-1/30Hz);

• наблюдения движущихся объектов с интервалам между отсчётами наблюдений 1 с (OCTAVA_PPA_Kinematic 1 Hz).

Каждая из программ способна обрабатывать наблюдения только системы GPS и предусматривает наличие оператора, устанавливающего файлы, которые необходимо обработать, и задающего настройки. Кроме того, была создана модификация программы для обработки наблюдений неподвижных пунктов с интервалами между отсчётами наблюдений от 1 до 5 с, которая предусматривала возможность непрерывной посуточной автоматизированной обработки наблюдений сети перманентных референцных станций Украины [18]. В ходе работы над данным продуктом коллективом исследователей было принято решение, что дальнейшие усилия будут направлены преимущественно на разработку продуктов для создания центров обработки ГНСС наблюдений. Доступ потребителей, желающих воспользоваться обработкой, должен в дальнейшем осуществляться с помощью интернета в интерактивном режиме.

Основной целью при применении ПАК ОСТАVА PPA является создание массивов наблюдений сетей базовых станций и потребителей, прошедших предварительную обработку, которые в дальнейшем могут использоваться для применения к ним различных методов точного позиционирования. В то же время конечные продукты предварительной обработки могут быть весьма ценными как для операторов сетей базовых станций и использующих их данные центров обработки, так и потребителей, таких как научные и учебные организации, компании, выполняющие геодезические, кадастровые и другие виды работ с использованием ГНСС и др. Причиной этого, во-первых, является то, что ПАК ОСТАVА PPA способен формировать массивы первичных наблюдений, прошедших предварительную обработку, например, в широко распространённом формате RINEX.

Это, во-первых, помогает потребителям улучшать качество получаемых ими результатов за счёт использования исходных данных, в которых вероятность появления аномалий в кодовых или фазовых наблюдениях значительно снижена. Во-вторых, оценки качества первичной измерительной информации, такие как уровень многолучевых и шумовых погрешностей кодовых наблюдений, могут помочь в оценке качества ГНСС-аппаратуры, мест размещения приёмных антенн и измерительных пунктов. В-третьих, потребителям может быть доступна полная информация об измерительном сеансе, включая данные об интервалах непрерывности фазовых наблюдений, что даёт возможность потребителям, основываясь на результатах, получаемых с использованием ОСТАVA_PPA, разрабатывать и применять собственные методы точного позиционирования.

Несмотря на положительные качества первой версии ОСТАVA_PPA, в ходе всестороннего тестирования с использованием наблюдений перманентных станций, а также статических и кинематических наблюдений, которые были любезно предоставлены компаниями, выполняющими геодезические работы, а также производителями и дистрибьюторами ГНСС-аппаратуры, были выявлены проблемные вопросы, требовавшие доработки как алгоритмической базы, так и программных модулей. Кроме того, во время тестирования были получены ценные предложения о расширении либо изменении функциональных возможностей алгоритмов и программ.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПАК ОСТАVА_РРА В 2009—2010 гг.

Ниже изложены усовершенствования и нововведения, которые были выполнены в 2009— 2010 гг. в ПАК ОСТАVА_РРА.

Главные усилия были направлены на создание такой программной реализации OCTAVA_PPA, которая могла бы применяться не только для решения научных, но и целого ряда актуальных практических задач. Было принято решение сконцентрировать на разработке программного комплекса для предварительной обработки наблюдений с наиболее распространёнными временными интервалами между отсчётами как для базовых станций, так и полевых или передвижных пунктов: от 1 до 5 с.

Важным шагом стало принятие новой архитектуры программного обеспечения (см. рисунок). Так, если ранее для наблюдений базовых станций и подвижных приёмников необходимо было воспользоваться разными программами, то теперь обработка выполняется с использованием одной и той же программы-ядра, общей для всех типов входных данных и режимов обработки. Настройка ядра для задания режимов обработки осуществляется путём формирования проектов (формализованных структур переменных), настройки из которых считываются в начале работы программы.

Также был проделан значительный объём работы, направленной на эмпирическое определение пороговых значений в различных процедурах, обеспечивающих, с одной стороны, минимальный уровень ложных срабатываний и сохранение максимального объёма данных для обработки, а с другой стороны — надёжное обнаружение и уст-



ранение ошибок в кодовых и фазовых наблюдениях для различных типов оборудования.

Ниже кратко описаны другие важные усовершенствования ПАК ОСТАVА_РРА.

Поддержка обработки наблюдений ГЛОНАСС. Логичным продолжением работы над ПАК ОСТАVA_РРА стала реализация поддержки обработки не только GPS-, но и GPS+ГЛОНАССнаблюдений.

Принятие решения о необходимости сравнительно простой алгоритмически, но трудоёмкой программно доработки (требуется пересмотр всех процедур обработки как кодовых, так и фазовых наблюдений) было вызвано необходимостью обработки наблюдений современного ГНССоборудования с возможностью приёма сигналов ГЛОНАСС. Так как принципы обработки кодовых и фазовых наблюдений для систем GPS и ГЛОНАСС сходны, то основной особенностью, которую пришлось учесть при реализации, стало частотное разделение навигационных сигналов, используемое в ГЛОНАСС. Кроме того, при создании программных модулей была учтена возможность поддержки и других ГНСС, таких как Galileo, EGNOS (если в будущем для этой системы будут доступны эфемериды для геостационарных спутников, вещающих дифференциальные поправки этой системы) и др.

Автоматическое обнаружение интервалов движения. Как было уже сказано выше, в процессе обработки наблюдений, особенно кинематических, есть необходимость оценки изменения координат приёмного пункта с течением времени, что необходимо для выполнения восстановления непрерывности фазовых наблюдений. Исследования, проведенные автором, показали, что информация о приращениях координат может быть использована для определения моментов, когда приёмник был неподвижен. В отличие от геодезических приёмников, где маркеры, указывающие на нахождение приёмника в движении расставляются оператором съёмки вручную, в программе реализован интервальный фильтр.

Логика работы этого фильтра в следующем: если есть моменты времени *i*, *i* – 1, *i* – 2, ..., *i* – *n*, для которых приращение длины вектора положения не превышает некоторого значения $V_{\rm max}$, то интервал *i*, ..., *i* – *n* считается интервалом времени, для которого антенна навигационного приёмника не перемещалась. Параметры *n* и $V_{\rm max}$ могут устанавливаться произвольными, однако экспериментально было установлено, что для надёжной работы фильтра при вероятности ложных тревог не более 1 % и интервале между отсчётами 1 с оптимальными являются значения n = 10 и $V_{\rm max} = 10$ см/с.

Эксперименты показали, что данный фильтр может надёжно маркировать статические и кинематические файлы, полученные в различных режимах съёмки. Интервальный фильтр хорошо себя зарекомендовал при обработке наблюдений, полученных в режиме «stop-and-go». Особенно он полезен, если при большом количестве статических сессий (10 и более) в исходном файле отсутствуют маркеры, обозначающие начало и окончание статических участков. Кроме того, могут быть обнаружены и устранены ошибки операторов оборудования, такие как перемещение приёмника во время интервала статической инициализации.

Особенности работы с файлами наблюдений. Первые программные реализации ПАК ОСТАVА_РРА предполагали, что информация базовых станций и потребителей (наблюдения и эфемериды) доступна в виде файлов формата RINEX 2.0.2.11. Опыт эксплуатации программного обеспечения показал, что это предположение усложняет и замедляет процесс обработки наблюдений из-за следующих обстоятельств:

• наблюдения базовых станций обычно хранятся в структуре файловых архивов (локальных, национальных, международных) где они с целью экономии дискового пространства преобразуются из формата RINEX в формат Compact RINEX (http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html);

• файлы наблюдений и эфемерид, размещённые в файловых архивах, а также файлы потребителей обычно упаковываются с использованием архиваторов для экономии дискового пространства; • доступ к файловым архивам базовых станций и, всё чаще, потребителей обычно осуществляется с использованием протоколов HTTP или FTP;

• иногда пользователи не имеют возможности выполнить преобразование наблюдений, сформированных их оборудованием в формате, защищенном авторскими и иными правами, обычно предусматривающем платный доступ к информации, в формат RINEX.

Решение каждой из этих задач средствами MatLab, также как и выполнение этих операций вручную с использованием стороннего программного обеспечения, показалось автору нерациональным. Поэтому были разработаны модули автоматизации, позволяющие управлять следующими программами без участия оператора:

• cURL (http://ru.wikipedia.org/wiki/CURL) — программное обеспечение для загрузки файлов с использованием протоколов HTTP, FTP и других позволяет полностью автоматизировать загрузку файлов из файловых архивов; поддерживает различные методы аутентификации и типы прокси-серверов;

• RNX2CRX, CRX2RNX (http://sopac.ucsd. edu/dataArchive/hatanaka.html) — набор утилит для преобразования файлов в формате RINEX в формат CompactRINEX и обратно;

• gzip (http://ru.wikipedia.org/wiki/Gzip) свободно распространяемый архиватор файлов;

• wconvert, gpbrin (http://www.novatel.com/ Documents/Waypoint/ Downloads/NavNet810_ Manual.pdf) — набор API-утилит из коммерческого программного продукта GrafNav/GragNet (требует приобретения лицензии, разрабатывается компанией NovAtel-Waypoint inc, Канада), позволяющие выполнить преобразование наблюдений большинства современных проприетарных форматов ГНСС- оборудования в формат RINEX 2.10.

Имея в распоряжении такой набор программного обеспечения и создав процедуры автоматизации его запуска, автор получил возможность в целом автоматизировать все перечисленные выше задачи загрузки и преобразования измерительных файлов.

Оптимизация работы. Первые программные реализации ОСТАVА_РРА были предназначены

для верификации разработанных методов и алгоритмов с целью изучения их свойств. При этом основное требование, которое при этом предъявлялось, состояло в точности соответствия программ и алгоритмов. В 2005 г. был взят курс на создание такого образца ПАК, который был бы способен решать не только научные, но и практические задачи. К моменту регистрации авторских прав на ОСТАVA_РРА в 2008 г., программный комплекс уже не единожды был использован при выполнении различных научно-практических задач, однако имел ряд ограничений.

Во-первых, сравнительно низкое быстродействие: время обработки одного измерительного файла, содержащего одни сутки измерительной информации, могло достигать 3...4 ч.

Во-вторых, при обработке файлов длительностью 12 ч и более часов возникали проблемы, вызванные ограниченным объёмом оперативной памяти.

В связи с тем, что ОСТАVА РРА должна стать одним из комплексов для создания центра по обработке ГНСС- наблюдений потребителей, то должны были быть приняты меры по оптимизации программных модулей, как по быстродействию, так и по объёму используемой памяти. Так как MatLab является преимущественно языком для научных исследований, то решению задачи оптимизации при изучении этой среды программирования обычно не уделяется достаточно внимания. В литературных источниках (см., наhttp://www.mathworks.com/matlabcenпример, tral/fileexchange/5685-writing-fast-matlab-code), созданных энтузиастами системы MatLab, можно найти рекомендации по созданию таких программных модулей, которые будут эффективно и максимально быстро выполнять любые задачи. При этом скорость выполнения операций, по наблюдению автора, может быть сопоставима со скоростью программ на языке С. Автором были разработаны и собственные приёмы оптимизации, что позволило сократить время обработки одного суточного файла наблюдений с 3...6 ч до 20-40 мин (в зависимости от числа аномалий в ceance).

Решение проблемы сегментирования оперативной памяти. Одной из проблем при работе с большими массивами (десятки-сотни мегабайт) в MatLab является проблема, которая может быть названа «сегментация памяти», которая проявляется в постепенном уменьшении максимального объёма переменной, которую возможно создать. Так, если непосредственно после запуска среды MatLab этот объём может составлять 1 гигабайт и более, то после активной работы с переменными объёмом в десятки-сотни мегабайт этот объём снижается на один-два порядка, что делает невозможным дальнейшую работу с такими массивами. После перезапуска среды программирования способность создавать большие переменные восстанавливается. Поэтому было предложено создать программу следующим образом.

Вспомогательная программа-скрипт формирует входные данные и структуры переменных настроек, необходимые для запуска ОСТАVА РРА. Затем для исполнения основной программы запускается ещё одна копия MatLab, используя возможности команды «dos». В новой копии выполняется проверка доступности необходимого пространства оперативной памяти с использованием команды «memory». Завершением работы основной программы является исполнение команды «exit», закрывающей дополнительную копию MatLab. Кроме того, подобный подход позволяет выполнять обработку нескольких файлов одновременно на многопроцессорных компьютерах с запуском нескольких независимых копий основной программы.

Применение Embedded MatLab. Embedded MatLab (http://www.mathworks.com/help/toolbox/ eml/) является пакетом расширения, позволяющим, при соблюдении синтаксиса, сходного, но всё же отличного от традиционного MatLab, создавать программы, которые встроенными средствами системы программирования преобразуются исходный код на языке С и компилируются в С-библиотеку. Скорость выполнения такой библиотеки, чаще всего выполняющей рутинные алгебраические и тригонометрические операции, может быть в 2-3 раза, а иногда и на порядок выше, чем у MatLab-прототипа.

Были разработаны процедуры, позволяющие компилировать такие С-библиотеки «на лету» при исполнении программы. Необходимость этого обусловлена тем, что размерности и типы всех переменных для процедур, написанных с применением Embedded MatLab, должны быть обязательно определены. При этом время, затрачиваемое на компиляцию, значительно меньше, чем выигрыш времени от использования Embedded MatLab.

Следует отметить, что использование описанного выше подхода, как показали исследования, оправданно лишь для процедур со значительным объёмом однотипных вычислений, например во вложенных циклах.

ПЛАНЫ ВНЕДРЕНИЯ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

К концу 2010 г. в ГАО НАНУ завершается создание Центра автоматизированной обработки ГНСС-наблюдений, целью которого является предоставление следующих услуг:

• анализ качества наблюдений потребителей;

• предоставление доступа к наблюдениям сети базовых станций, прошедших предварительный контроль качества;

• автоматизированная обработка статических и кинематических наблюдений потребителей с целью получения высокоточных координатных решений;

• пересчет систем координат и др.

Одной из важнейшей составляющей программного комплекса создаваемого Центра обработки наблюдений будет ПАК ОСТАVА, который будет выполнять обработку двухчастотных и одночастотных ГНСС (GPS+ГЛОНАСС+SBAS) наблюдений сети перманентных референцных станций и наблюдений потребителей Украины, выполненных в статическом и кинематическом режимах измерений. Отличительной особенностью вычислительного комплекса Центра обработки является возможность получения сантиметровой точности позиционирования (как в статическом, так и в кинематическом режимах) по результатам наблюдений сравнительно недорогого одночастотного геодезического ГНСС-оборудования, которое в настоящее время весьма широко используется в Украине при выполнении геодезических, кадастровых и других работ, где требуется высокая точность координатных определений.

Дальнейшее развитие описанного программного комплекса предполагает продолжение работ по расширению функциональных возможностей ПАК ОСТАVА_РРА путём усовершенствования существующих, создания и внедрения новых методов и алгоритмов предварительной обработки и анализа ГНСС-наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный отечественный ПАК ОСТАVА_ РРА не имеет аналогов в Украине, является конкурентоспособным уникальным научно-техническим продуктом многолетней разработки и исследований творческого коллектива авторов. Данный комплекс позволил выполнить целый ряд актуальных научно-практических исследований в области разработки новых эффективных методов и алгоритмов точного ГНССпозиционирования и представляет собой серьезный научный и практический базовый инструмент, без которого исследования, создание и внедрение новых передовых методов обработки ГНСС-информации будут либо невозможны, либо существенно ограниченны.

Представленная в данной статье разработка финансировалась ГАО НАНУ на протяжении 2002—2010 гг. Результаты модернизации описанного программного комплекса получены в ходе выполнения научно-технического проекта «Оптимізація мережі перманентних ГНСС-станцій України та дослідна експлуатація центру збору та обробки інформації для забезпечення робіт з геодезії, кадастру та навігації рухомих об'єктів», который выполняется в 2010 г. ГАО НАНУ по заказу НАН Украины, и научно-исследовательской работы «Розробка, дослідження та тестування програмного забезпечення автоматизованої мережної обробки ГНСС-спостережень», выполняемой ХНУРЭ по заказу ГАО НАНУ.

Автор признателен Я. С. Яцкиву за всестороннюю поддержку разработки, а также А. А. Жалило за помощь в подготовке рукописи.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтнеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS).

Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995. — 380 с.

- Жалило А. А., Шелковенков Д. А. «ОСТАVА»: многофункциональный программный инструментарий обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений // Интегрированные навигационные системы: Тр. XIV междунар. конф. — С.-Пб., 2007. — С. 319—321.
- 3. Жалило А. А., Шокало В. М., Саданова Н. В. и др. Сглаживание двухчастотных кодовых GPS-наблюдений с использованием фазовых в режиме послесеансной обработки // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сб. тр. 2-го Междунар. радиоэлектронного Форума (МРФ-2005). Междунар. конф. по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), Харьков, ХНУРЭ, 19—23 сентября 2005 г. — Харьков: ХНУРЭ, 2005. — Т. 2. — С. 548— 551.
- 4. *Жаліло О. О., Шелковєнков Д. О.* Програмний продукт «Програмний комплекс ОСТАVА_РРА» // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 24507. Київ: Міністерство освіти і науки, 2008.
- 5. Інформаційно-вимірювальна GNSS-система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок: Зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування європейський досвід» (Чернігів, 21 23 травня 2008 р.). Чернігів: Чернігівський державний ін-т економіки і управління, 2008. Вип. 4. С. 5—24.
- 6. *О контроле* качества двухчастотных GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки: Праці міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 22—26 травня 2006 р.). Одеса: BMB, 2006. Т. 1. 233 с.
- Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.
- Шелковенков Д. А. Контроль качества кодовых и фазовых GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки // Интегрированные навигационные системы: Тр. XIV междунар. конф. С.-Пб., 2007. С. 310—312.

- Bisnath S. B., Kim D., Langley R. B. A new approach to an old problem: carrier-phase cycle slips // GPS World. 12, N 5. P. 46–51.
- Estey L. H., Meertens C. M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data // GPS Solutions. – 1999. – 3. – P. 42–49.
- Hewitson S., Wang J. GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performance analysis // GPS Solutions. – 2006. – 10 (3). – P. 155–170.
- Zhalilo A. A., Sadanova N. V. Pre-Processing and Analysis software «OCTAVA_PPA»: concept, possibilities and features, initial test results // Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS (GNSS 2004), Sydney, Australia, 6–8 December 2004.
- Zhalilo A. A., Sadanova N. V. Carrier-phase cycle-slip detection, estimation and correction of dual-frequency GPS data – new efficient technique, algorithms and experimental results // Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future: Abstract book. – Kiev: Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004. – P. 154.
- Zhalilo A., Shelkovenkov D. Features and service performance of multifunctional software toolkit OCTAVA for processing and analysis of GPS/GNSS observations // GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1–2 March 2007. Prague, 2007. P. 102–110.

Надійшла до редакції 28.12.10

D. A. Shelkovenkov

MULTIFUNCTIONAL SOFTWARE-ALGORITHMIC COMPLEX FOR PRE-PROCESSING OF GNSS-OBSERVATIONS, OCTAVA_PPA

We consider the principles of the construction and functioning of the universal software-algorithmic complex OCTAVA_ PPA intended for the preliminary post-session processing of observations of global satellite navigation systems (GNSS). The methodical and algorithmic basis of the complex, its functional abilities and characteristics are presented. The improvements of the software complex during 2009—2010 are described. Some prospects for the development and implementation of the complex are briefly considered.

УДК 538.95, 536.46

О. Ю. Актан¹, Ю. Ф. Забашта¹, В. Я. Черняк¹, С. Г. Орловська², О. С. Свєчнікова¹, Ф. Ф. Карімова², М. С. Шкоропадо²

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка ² Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ДВИГУНА НА ПАРАФІНОВОМУ ПАЛИВІ ДЛЯ ГІБРИДНИХ РАКЕТ. КІНЕТИКА ПЛАВЛЕННЯ І ГОРІННЯ

Досліджуються кінетика плавлення та горіння парафінових систем, для яких експериментально визначено характеристики поширення фронту плавлення та горіння. На основі отриманих даних пропонується механізм розпилення парафінових палив, у основу якого покладено уявлення щодо втрати стійкості розплавленого шару.

вступ

На даний час однією з актуальних проблем в аерокосмічній галузі є створення малошкідливих видів палив. Як відомо [14], з 2001 р. почались інтенсивні дослідження парафінів з метою їхнього використання як твердого ракетного палива. Головними перевагами цих палив вважається висока калорійність, екологічність, безпека зберігання, висока хімічна інертність при впливові зовнішніх факторів та ін. Перше дослідження двигуна на парафіноподібному паливі було проведено співробітниками Стендфордського університету.

Для створення ефективної конструкції двигуна на парафіновому паливі необхідна інформація щодо повного компонентного складу та оптимального співвідношення мас палива та окислювача, геометричних параметрів паливного блоку, системи регулювання подачі окислювача, системи запалювання, термодинамічних та енергетичних характеристик, швидкості горіння палива в широкому діапазоні параметрів, що впливають на цей процес, експлуатаційних властивостей палив і т. п. Для отримання таких даних необхідним є проведення систематичних фізичних досліджень.

Як відомо, основними складовими частинами твердопаливного ракетного двигуна є запалювальний пристрій, паливний заряд, корпус, сопло [7, 9]. Спрощену схему такого двигуна приведено на рис. 1. Заряд палива може бути вкладений до камери згоряння у вигляді однієї або декількох шашок.

Також відомо, що остаточному використанню парафінів у двигунах широкого класу літальних апаратів перешкоджає проблема невисокої швидкості регресії екологічного парафінового палива (fuel regression rate) [10]. Зазначена величина являє собою часову залежність внутрішнього радіуса циліндричного паливного заряду, який змінюється в результаті вигоряння палива та характеризує ефективність його спалювання [12]. Процесу горіння передують численні процеси, які впливають на величину швидкості регресії: плавлення палива, розпилення палива, рух утворених краплин у потоці окислювача та ін. Дослідження перерахованих процесів разом з горінням є складною фізичною проблемою. Серед небагатьох робіт відоме дослідження [16], де збільшення регресії палива пов'язувалось з реологічними властивостями

[©] О. Ю. АКТАН, Ю. Ф. ЗАБАШТА, В. Я. ЧЕРНЯК,

С. Г. ОРЛОВСЬКА, О. С. СВЄЧНІКОВА,

Ф. Ф. КАРІМОВА, М. С. ШКОРОПАДО, 2011

розплавленого шару та робота [17], присвячена емпіричному підбору ефективних компонентів парафінової суміші шляхом введення різноманітних нанодомішок.

В нашій роботі, на відміну від наявних емпіричних досліджень, робиться спроба розв'язати поставлену проблему на основі фізичних моделей.

ДЕФОРМАЦІЯ ПАРАФІНОПОДІБНОГО ПАЛИВА У ПРОЦЕСІ ПЛАВЛЕННЯ

Під час роботи ракетного двигуна на його експлуатаційні параметри суттєво впливають деформаційні властивості палива. Однією з характеристик цих параметрів є модуль зсуву. Величину модуля зсуву будемо розраховувати за методикою, запатентованою авторами та викладеною в роботах [1, 2, 10]. Експериментальна реалізація цієї методики полягає в тому, що досліджувана речовина розташовується в кюветі. Саме ця обставина дозволяє розрахувати модуль зсуву як різницю жорсткостей між заповненою парафіном та порожньою кюветами.

На рис. 2 наведено часову залежність модуля зсуву докозану $C_{22}H_{46}$ — типового представника ряду н-парафінів (виробник — Новочеркаський завод синтетичних продуктів; марка докозану (ч — чистий)) при температурі 48 °C. Оскільки температура плавлення докозану становить 45 °C, то залежність *G*(*t*) описує зміну модуля зсуву у процесі плавлення. Ту обставину, що в зазначених умовах протікає процес плавлення, підтверджує рис. 3, на якому зображено зріз кювети з парафіном, де темний шар поблизу поверхні кювети відповідає розплавленому парафіну.

Після 28 хв візуальною перевіркою було встановлено, що на цей час досліджуваний матеріал повністю розплавився. Таким чином, значення модуля зсуву G, що відповідає 28-й хвилині, є модулем зсуву розплаву. Як видно з рис. 2, $G \approx \approx 10^7 \text{ Па.}$

ШВИДКІСТЬ ФРОНТУ ПЛАВЛЕННЯ У ПАРАФІНОПОДІБНОМУ ПАЛИВІ

Для вимірювання швидкості фронту плавлення використано вище наведений експериментальний метод визначення модуля зсуву. Як видно з рис. 3, до поверхні кювети прилягає шар розплавленого парафіну, у центрі ж кювети розташовується циліндр радіусом r_1 , що відповідає твердому парафіну. Використовуючи розв'язок задачі теорії пружності про крутіння складеного стрижня [13] з модулями пружності твердого парафіну G_K (у початковий момент часу) та розплавленого парафіну G_M (в кінцевий момент вимірювання) отримуємо для величини r_1



Рис. 2. Часова залежність модуля зсуву G(t) докозану $C_{22}H_{46}$ при температурі 48 °С



Рис. 1. Спрощена схема двигуна на твердому паливі (1 — запалювальний пристрій, 2 — паливний заряд, 3 — корпус, 4 — сопло)



Рис. 3. Зріз кювети з парафіном в процесі плавлення



Рис. 4. Кінетика зміни радіусу шару розплавленого парафіну

формулу

$$r_1 = r_2 \left(\frac{G - G_M}{G_K - G_M}\right)^{1/4},$$
 (1)

де r_2 — внутрішній радіус кювети. Розраховані по цій формулі значення r_1 представлено на рис. 4. Приймаючи, що швидкість фронту плавлення є сталою, що відповідає прямій лінії на рис. 4, отримуємо значення швидкості плавлення, рівне 0.036 м/с.

ШВИДКІСТЬ ФРОНТУ ГОРІННЯ ПАРАФІНОВОГО ПАЛИВА

Для вивчення кінетики горіння парафіну та визначення константи швидкості горіння [8] було створено експериментальний стенд, зображений на рис. 5. Крапля парафіну 1 навішувалася на підвіс. На рис. 6 у збільшеному вигляді зображено краплину парафіну після закінчення процесу плавлення — на початку процесу спалахування. Температура полум'я палаючої краплі фіксувалася за допомогою двох хромель-алюмелевих термопар 2, 3. Нижня термопара знаходилася на відстані 7 мм від краплини, а верхня — на відстані 15 мм. Сигнал від термопар поступав на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 4, а потім на USB-шину персонального комп'ютера 5. Отримана інформація виводилась на екран монітора, а також зберігалась у пам'яті комп'ютера. Висота полум'я фіксувалася за допомогою другої цифрової відеокамери 6. Зміна діаметра краплі фіксувалася за допомогою цифрової відеокамери 8, встановленої на мікроскопі 7 зі збільшенням у шістнадцять разів. Підпалювання краплі здійснювалося за допомогою стаціонарного полум'я 9 з температурою 900 К. Отримані за допомогою цифрових відеокамер відеофайли зміни діаметра та висоти полум'я розкодовувались та оброблювались на комп'ютері в пакеті MatLab 7.0.

На рис. 7 приведено часову залежність зміни квадрата діаметра парафінової краплини з початковим діаметром $d_b = 1.41$ мм у процесі горіння. Отримані експериментальні дані підтверджують лінійну залежність діаметра палаючої краплі із часом (закон Срезневського [5]):



ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

$$d^2 = k_{bur}t , \qquad (2)$$

де k_{bur} — константа швидкості горіння. За даними рис. 7 константа швидкості горіння склала $k_{bur} = 0.4206 \text{ мм}^2/\text{с}$. Також встановлено, що температура полум'я краплі може досягати T = 800 K, а максимальна висота полум'я складає 16 мм.

МЕХАНІЗМ РОЗПИЛЕННЯ ПАРАФІНОВОГО ПАЛИВА

Важливу роль при спалюванні парафінового палива відіграє процес розпилення, що в значній мірі визначає величину швидкості регресії. У роботі [14] запропоновано такий механізм розпилення (рис. 8): на поверхні твердого палива 2 виникає шар розплаву З. В результаті взаємодії з потоком окислювача 5 на поверхні шару виникають капілярні хвилі, що утворюють шар 4, який розділяє рідкий шар 3 та зону горіння 1. Згідно з роботою [6] для того щоб на поверхні розплаву виникли капілярні хвилі, розплав повинен бути рідиною, у розумінні механіки суцільних середовищ, а саме — модуль зсуву розплаву повинен дорівнювати нулеві. Однак, як це видно з рис. 2, модуль зсуву розплавленого парафінового зразка значно відрізняється від нуля. Це викликає сумніви у справедливості механізму розпилення, запропонованого в роботі [14].

На нашу думку, цей механізм має іншу природу: розпилення є результатом того, що розплавлений шар втрачає стійкість [11]. Дійсно, в результаті продування окислювача паливо піддається дії стискного напруження. Оскільки, як вже вказувалось, модуль зсуву розплавленого шару не дорівнює нулеві, то матеріал цього шару не можна розглядати як рідину, а варто вважати деяким в'язкопружним середовищем. Природно, що цей шар зв'язаний з нерозплавленою підкладкою визначеними пружними силами, що з'являються у проміжному шарі, який розділяє тверді і розплавлені ділянки матеріалу.

Отже, ми приходимо до моделі в'язкопружної циліндричної оболонки, що зображає розплавлений шар, розташований на пружній підкладці, який відповідає проміжному шарові (рис. 9, a). Під дією стискних напружень прямолінійна форма оболонки втрачає свою стійкість. Більш стійкою виявляється хвиляста форма (рис. 9, δ). Стискне напруження продовжує деформувати



Рис. 6. Зображення парафінової краплини на початку процесу спалахування (збільшено в 50 разів)



Рис. 7. Часова залежність квадрата діаметра частинки докозану $d^2(t)$ в процесі горіння ($d_b = 1.41$ мм)



Рис. 8. Механізм розпилення парафіноподібного палива



Рис. 9. Етапи деформації (*a*, *б*, *в*) та розпилення (*г*) розплавленого шару парафіноподібних систем

оболонку (рис. 9, *в*) доти, поки не відбувається її руйнування, що по суті є розпиленням (рис. 9, *г*). Розмір крапель, що утворюються, залежить від швидкості деформації розплавленого шару під дією градієнтів тиску і температури.

висновки

Однією з головних задач, що постає перед розробниками ракетних двигунів, є досягнення ефективного згоряння палива. Для розв'язку цієї задачі необхідно визначити оптимальні режими горіння, які характеризуються такими параметрами як тиск, температура, швидкість руху фронту полум'я й ін., що в свою чергу вимагає створення теоретичних основ горіння парафіноподібних палив.

Аналіз літературних джерел показав, що розробка такої теорії знаходиться в зародковому стані. Однією з ключових проблем є визначення реологічних властивостей речовин, що беруть участь у горінні. Саме реологічні параметри у визначених випадках диктують вибір режимів горіння. У роботі показано, що загальноприйнята думка про розплав парафіну як про типову рідину з нульовим модулем зсуву не відповідає дійсності. Цей факт ставить під сумнів запропонований раніше механізм розпилення палива внаслідок капілярних хвиль. Значна величина модуля зсуву розплаву дозволяє розглядати розплавлений шар як в'язкопружне середовище.

З врахуванням даної обставини автори запропонували інший механізм розпилення, в основі якого лежить уявлення щодо втрати стійкості розплавленого шару. Втрата стійкості відбувається по всій довжині камери згоряння, що призводить до утворення аерозольних крапель розплаву в об'ємі камери. Таким чином, необхідними також є дослідження кінетики випаровування краплі парафіну, процесів запалення і горіння аерозолю в окисному середовищі [3, 4], що часто мають вибуховий характер. Щоб встановити механізми тепломасообміну при запаленні і горінні краплі парафіну і визначити основні характеристики горіння (температуру, швидкість горіння тощо), необхідно використовувати сучасні діагностики високотемпературних швидкоплинних процесів.

- 1. *Булавин Л. А., Актан О. Ю., Мягченко Ю. О. и др.* Компьютеризация метода крутильных коллебаний // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 164—165.
- 2. *Булавин Л. А., Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф. и др.* Применение метода крутильных колебаний для изучения переходов между жидким и твердым агрегатными состояниями вещества // Письма в ЖТФ. — 2010. — **36**, № 6. — С. 66—72.
- Зельдович Я. Б., Баренблатт С. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
- Калинчак В. В., Стручаев А. И., Орловская С. Г. Инерционные характеристики пламени капель углеводородов при его гистерезисе // Физика горения и взрыва. — 1990. — № 1. — С. 92—96.
- 5. *Кнорре Г. Ф., Палеев И. И.* Теория топочых процессов. М.: Энергия, 1966. 491 с.
- 6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- 7. *Назаров Г. А., Прищепа В. И.* Космические твёрдотопливные двигатели. — М.: Знание, 1980. — 63 с.
- Орловская С. Г., Калинчак В. В., Шкоропадо М. С. и др. Определение характеристик горения капель докозана // Тезисы докладов XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы». — 2010. — С. 222— 223.
- Пат. 78427 Украина. Ракетный двигатель твердого топлива / Н. А. Калашников, В. Г. Королев, А. И. Красников, И. П. Балицкий, В. Ф. Кублик, В. Г. Мамонтов. — Опубл. 01.08.2005.
- Пат. 78094 Україна, МПК ⁷G01N11/16. Спосіб визначення реологічних характеристик консистентних рідин / Л. А. Булавін, О. Ю. Актан, Ю. Ф. Забашта, Т. Ю. Ніколаєнко. Опубл. 15.02.2007.
- 11. *Пасынский А. Г.* Коллоидная химия. М.: Высш. шк., 1959. 265 с.
- 12. *Прищепа В. И*. Космонавтика: Энциклопедия. М.: Сов. энцикл., 1985. 528 с.
- 13. *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. Киев: Наук. думка, 1972. 501 с.

- Dornheim 1. M. Ideal hybrid fuel is wax // Aviation week and space technology. – 2003. – N 3. – P. 52–54.
- Greatrix D. Regression rate estimation for standard-flow hybrid rockets engines // Aerospace Sci. and Technology. – 2009. – 13, N 7. – P. 358–363.
- Nakagawa I., Hikone S., Suzuki T. Astudy on the regression rate of paraffin-based hybrid rocket fuels // Abstracts of 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. — Denver, Colorado, 2009. — P. 4935.
- Van Pelt D., Hopkins J., Skinner M. and other .Overview of a 4-inch OD paraffin-based hybrid sounding rocket program // Abstracts of 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. — Fort Lauderdale, FL, 2004. — P. 358.

Надійшла до редакції 15.09.10

O. Yu. Aktan, Yu. F. Zabashta, V. Ya. Chernyak, S. G. Orlovskaya, O. S. Svechnikova, F. F. Karimova, M. S Shkoropado

PHYSICAL FOUNDATION FOR THE CONSTRUCTION OF PARAFFIN-BASED HYBRID ROCKET ENGINES. KINETICS OF MELTING AND COMBUSTION

The kinetics of melting and combustion for paraffin systems is investigated. For these systems, some characteristics of the propagation of the front of melting and combustion are experimentally determined. A mechanism of the dispersion of paraffin fuels is proposed on the basis of the obtained information. The foundation of the mechanism is the notion of loss in stability of the paraffin molten layer. УДК 550.388, 551.520.3

А. К. Федоренко

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

НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НАД ПОЛЯРНЫМИ ШАПКАМИ ЗЕМЛИ

За даними вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» досліджено напрямки розповсюдження середньомасштабних акустико-гравітаційних хвиль (AГХ) в полярних областях. Встановлено, що АГХ над полярними шапками систематично розповсюджуються назустріч вітру на висотах 250—350 км. Над північною полярною шапкою помітна тенденція поширення АГХ проти годинникової стрілки, над південною полярною шапкою — за годинниковою стрілкою. При цьому основна частина хвиль згрупована переважно за двома напрямками: 1) до магнітного полудня — назустріч вітру збуреної полярної циркуляції і 2) в напрямку до 14—16 годин — назустріч глобальному термосферному вітру, що дме з області низьких широт. В умовах полярного дня і полярної ночі картина рухів АГХ змінюється в обох півкулях у повній відповідності з сезонною перебудовою динаміки полярних вітрів.

введение

Акустико-гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в динамике и энергетике верхней атмосферы, обеспечивая перераспределение энергии атмосферных возмущений в глобальном масштабе. Эти волны исследуются уже более полувека многочисленными наземными методами диагностики ионосферы и, в значительно меньшей степени, на основе прямых спутниковых измерений. Анализ измерений на спутнике «Dynamics Explorer-2» (DE2) показал, что над полярными шапками обоих полушарий на высотах F2-области ионосферы систематически наблюдаются АГВ с большими относительными амплитудами (до 10 %) и выделенными спектральными свойствами: горизонтальными длинами волн 500-650 км, периодами 12.5-14.0 мин [2, 11]. Помимо специфических спектральных свойств, для этих волн характерно систематическое направление распространения из ночи в

день [4]. Указанные особенности полярных АГВ позволяют предположить наличие фильтрующего эти волны глобального механизма. Таким механизмом может быть ветер.

Влияние ветров на распространение АГВ изучалось одновременно с развитием теории этих волн. Например, в работе [6] было показано, что ветер оказывает на АГВ фильтрующее по направлению воздействие. По данным наземных наблюдений получены экспериментальные свидетельства ветровой фильтрации. В частности, получено, что на высотах F-области ионосферы в обоих полушариях среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) обнаруживают циркулярное закручивание азимутов в направлении против ветра [7, 17]. Численное моделирование волнового поля АГВ на высотах F2-области ионосферы от приземных источников в реалистичной атмосфере с учетом профиля ветра также показало, что АГВ предпочтительно распространяются против ветра [16]. С учетом вязких потерь оказывается, что только против ветра АГВ от источников снизу могут достигать ионосфер-

[©] А. К. ФЕДОРЕНКО, 2011

ных высот по кратчайшему пути (за счет укорочения лучевых траекторий) с минимальными потерями энергии [8].

Исследование связи АГВ с ветром на основе спутниковых измерений параметров нейтральной атмосферы до сих пор не проводилось. Главная причина этого — отсутствие методик, позволяющих восстанавливать направление АГВ в спутниковых измерениях in situ. В данной работе с использованием оригинальной методики определены преобладающие азимуты распространения АГВ в полярных областях и исследована их связь с ветром по данным спутника DE2. Контактные спутниковые измерения позволяют изучать волны непосредственно в нейтральной атмосфере, а не только в ионосферной плазме, поведение которой существенно усложняется в высоких широтах из-за влияния электрических полей и высыпаний заряженных частиц. Кроме того, со спутника обеспечивается глобальность исследования, недоступная наземным методам. Скорости термосферных полярных ветров составляют 200-800 м/с в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности [12] и, таким образом, перекрывают весь возможный в атмосфере Земли диапазон фазовых горизонтальных скоростей АГВ. Поэтому влияние ветров на распространение АГВ в полярных областях должно быть очень значительным, возможно, даже определяющим.

Орбита спутника DE 2 — эллиптическая с высотой 250...1010 км, наклонение 89.9°, период обращения 98 мин. Благодаря такой конфигурации спутник на каждом витке пролетал вблизи географических полюсов и пересекал полярные шапки. На DE2 были установлены датчики параметров нейтральной атмосферы, что позволяет одновременно исследовать ветер и характеристики АГВ, комбинируя синхронные измерения разных приборов. Для анализа АГВ и ветра в работе были использованы измерения концентрации и скорости нейтральных частиц на участках витков ниже 400 км. Концентрации нейтральных составляющих: атомарного кислорода (О), молекулярного азота (N_2) , аргона (Ar) и гелия (He) измерялись на DE2 с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [5]. На нижних участках витков DE2 горизонтальная составляющая скорости спутника на порядок превышает вертикальную составляющую, поэтому движение спутника можно считать почти горизонтальным. Составляющая скорости нейтральных частиц вдоль вектора V_s скорости спутника измерялась в эксперименте FPI (Fabry-Perot Interferometer) по доплеровскому сдвигу частоты красной кислородной эмиссии О λ 630.0 нм [9]. Температура и две составляющие скорости нейтральных частиц: вертикальная и горизонтальная, перпендикулярная к вектору V_s скорости спутника, измерялись в эксперименте WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [15]. Отметим, что при наклонении орбиты DE2 89.9° в эксперименте FPI фактически измерялась горизонтальная меридиональная составляющая скорости, а в эксперименте WATS — горизонтальная зональная.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В КОНТАКТНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

С борта спутника непосредственно измеряется только горизонтальная составляющая длины волны вдоль витка. Однако наличие синхронных измерений разных атмосферных параметров позволяет восстанавливать многие свойства АГВ: временной период, фазовую скорость, направление распространения [2, 3]. Для исследования связи АГВ с ветром в первую очередь необходимо знать направление движения волн относительно спутника. Вначале покажем, как можно по спутниковым измерениям определить направление распространения АГВ по вертикали, затем исследуем возможность определения горизонтальных азимутов волн.

Определение знака k_z . Характерной особенностью АГВ является то, что по горизонтали энергия и фаза волны распространяются в одном и том же направлении, а по вертикали — в противоположных направлениях. О распространении АГВ снизу вверх обычно говорят в смысле направления переноса энергии, при этом фаза волны распространяется вниз [1]. При изучении АГВ обычно вводят неподвижную декартову систему координат, в которой ось *X* лежит в



Рис. 1. Колебания вертикальной компоненты скорости V_z и относительные вариации концентрации $\delta n/n$ по измерениям на спутнике DE2: *a* — северная полярная шапка, июнь; *б* — южная полярная шапка, январь

горизонтальной плоскости и направлена вдоль распространения волны, а ось Z направлена вертикально вверх. В такой системе координат распространению АГВ снизу вверх соответствует условие $k_z < 0$. Знак k_z можно определить, сравнивая экспериментальные зависимости для разных параметров с теоретическими соотношениями. Удобно использовать для этого измерения концентрации и скорости нейтральных частиц. Теоретическая зависимость между вертикальной составляющей скорости V_z и относительными вариациями концентрации $\delta n/n$ в АГВ имеет вид [10]

$$V_{z} = \frac{\omega H \left(1 - \frac{\gamma^{2} H^{2} k_{x}^{2} \omega_{B}^{2}}{(\gamma - 1) \omega^{2}} \right)}{k_{z} H + i \left(\frac{\gamma \omega_{B}^{2} H^{2} k_{x}^{2}}{\omega^{2}} - \frac{1}{2} \right)} \frac{\delta n}{n}, \qquad (1)$$

где $H = kT_n/\bar{m}g$ — высота однородной атмосферы, k — постоянная Больцмана, T_n — температура нейтрального компонента, \bar{m} — средняя масса атомов и молекул, g — ускорение свободного падения, γ — показатель адиабаты, k_x, k_z — горизонтальная и вертикальная составляющие волнового вектора, ω — частота волны, $\omega_B = g\sqrt{(\gamma - 1)}/c$ — частота Брента — Вяйсяля, c — скорость звука.

Экспериментальные зависимости колебаний V_{z} и $\delta n/n$ показаны на рис. 1 для двух витков DE2 по данным работы [3]. Для получения из исходных рядов данных вариаций АГВ производилась предварительная обработка, включающая: 1) отделение волновых форм от трендов с использованием фильтра скользящего среднего; 2) идентификацию типа волн по амплитуднофазовым соотношениям между разными параметрами [3]. Относительные вариации концентрации $\delta n/n$ получены путем нормирования волновых изменений на усредненные фоновые значения. Согласованный характер волновых форм в параметрах, измеренных разными датчиками, подтверждает адекватность процедуры снятия тренда. Поскольку горизонтальные фазовые скорости АГВ на порядок меньше скорости спутника DE2 (7.9 км/с), с борта регистрируется фактически распределение волнового процесса в пространстве. Поэтому зависимость параметров от UT на рис. 1 дает информацию о пространственном масштабе волнового процесса вдоль витка спутника $\Delta x = V_s \Delta UT$, а не о временном периоде.

Колебания V_z и $\delta n/n$ в полярных АГВ оказались близки к синфазным. Приравнивая к нулю мнимую часть и учитывая, что $c^2 = \gamma g H$, из (1)


Рис. 2. Направления движения акустико-гравитационных волн вдоль орбиты спутника на 8286 витке: a — вариации вертикальной скорости и смещения; δ — относительные вариации концентраций O и N₂

получим

$$V_z \approx \frac{\omega}{k_z} \left[1 - \left(\frac{c}{U_x}\right)^2 \right] \frac{\delta n}{n},$$
 (2)

где $U_x = \omega/k_x$ — фазовая горизонтальная скорость волны. Из дисперсионного уравнения следует, что для АГВ всегда выполняется условие $U_x < c$ [10]. Поэтому показанный на рис. 1 характер колебаний концентрации и скорости возможен только при $k_z < 0$. Таким образом, заключаем, что источники наблюдаемых АГВ находятся ниже уровня спутника.

Направление движения АГВ вдоль вектора скорости спутника. Определить направление АГВ вдоль V_s можно достаточно просто при наличии синхронных измерений скорости и концентрации нейтральных частиц [4]. Скорость на DE2 измерялась в системе координат спутника (СКС): ось X_{s} выбрана вдоль вектора скорости спутника V_s , Y_s направлена вертикально вверх, Z_{\circ} дополняет правую тройку векторов. Каждые полгода в целях теплового контроля спутник переворачивался, что соответствовало переходу из системы координат $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ в $\{X_s, -Y_s, -Z_s\}$. Это нужно учитывать при анализе измеряемых составляющих скорости. В эксперименте FPI дистанционно измерялась горизонтальная составляющая V_{xs} , направленная вдоль \mathbf{V}_s . В эксперименте WATS производились контактные измерения двух составляющих скорости — вертикальной V_{ys} и горизонтальной V_{zs} , перпендикулярной к \mathbf{V}_{s} .

Для волны, распространяющейся в пространстве, профиль колебаний вертикальной скорости опережает по фазе колебания вертикального смещения на $\pi/2$. Синхронные вариации вертикальной скорости по измерениям WATS и вертикального смещения h, рассчитанного по масс-спектрометрическим измерениям концентраций, показаны на рис. 2, а. На представленном витке АГВ движется навстречу спутнику. Есть возможность определять направление АГВ еще проще — только по измерениям концентраций двух сортов атмосферных газов [2]. На основе соотношений теории АГВ легко показать, что колебания концентрации относительно легкого О по фазе всегда ближе к колебаниям вертикальной скорости, а более тяжелого N₂ – к вертикальному смещению. В результате профили колебаний концентраций О и N₂ как бы «зажаты» между профилями колебаний скорости и смещения. Сдвиг фаз между колебаниями n(O) и $n(N_2)$ зависит от спектральных свойств волны, но, как правило, не превышает 40°, при этом опережение колебаний О всегда указывает на направление движения АГВ (рис. 2, б).



Рис. 3. Вертикальная (V_{ys}) и горизонтальная (V_{zs}) составляющие скорости в СКС «Dynamic Explorer-2» на витке 8051 (северная полярная шапка, прямая мода): *a* — исходные ряды измерений, *б* — волновые вариации после исключения тренда

Направление движения акустико-гравитационных волн перпендикулярно к вектору скорости спутника. Направление движения АГВ, перпендикулярное к вектору скорости спутника, можно определить на основе анализа измерений составляющих скорости. Рассмотрим исходные ряды измерений скорости V_{zs} (зональная) и V_{ys} (вертикальная) (рис. 3, а) и волновые вариации в этих же компонентах $V_{zs} - \overline{V_{zs}}$ и $V_{ys} - \overline{V_{ys}}$ после исключения тренда (рис. 3, б) на витке 8051, когда измерения проводились в прямой моде. Сглаженные кривые \overline{V}_{zs} и \overline{V}_{ys} получены с использованием фильтра скользящего среднего, размеры окна которого выбирались исходя из преобладающей длины волны в компоненте $V_{_{\rm MS}}$. В распределении вертикальной скорости $V_{_{VS}}$ тренды незначительны, и поэтому горизонтальную длину волны можно определять стандартными методами спектрального анализа непосредственно по исходным рядам измерений (без предварительного снятия тренда). В параметре V_{zs} волновые вариации едва заметны на фоне сильных зональных ветров. Наблюдается также эффект вращения Земли, который схематически показан пунктирной линией. После исключения тренда наблюдается или почти синфазный, или почти противофазный характер колебаний измеренных вертикальной и горизонтальной составляющих скорости (рис. 3, *б*).

Согласно теории АГВ колебания горизонтальной и вертикальной составляющих скорости частиц связаны соотношением [10]

$$\frac{V_x}{V_z} = \frac{-k_z + i\eta}{k_x [1 - (U_x / c)^2]},$$
(3)

где $\eta = (1 - \gamma/2)g/c^2$ — параметр среды, V_x горизонтальная и V_z — вертикальная составляющие скорости частиц в системе координат АГВ. Как видно из (3), сдвиг фаз между колебаниями составляющих скорости определяется только значением k_z и свойствами среды: $\varphi = -\operatorname{arctg}(\eta/k_z)$. Для $k_z < 0$ во всем диапазоне возможных значений вертикальных волновых чисел этот угол теоретически может изменяться от 0 до $\pi/2$, но при типичных спектральных характеристиках волн он обычно не превышает 30°. Для случая $k_z < 0$ рассмотрим, как связаны системы координат АГВ и спутника. В прямой моде вертикальная составляющая скорости АГВ совпадает с вертикальной составляющей скорости в СКС $V_{ys} = V_z$. В горизонтальной плоскости связь между V_{zs} и V_x определяется углом, под которым распространяется АГВ относительно оси Z_s. Возможные варианты направлений движе-

ния АГВ относительно спутника (стрелки 1-4) в прямой моде показаны на рис. 4. Если проекция волнового вектора на ось Z_s положительна (1 и 2), между колебаниями составляющих V_{rs} и $V_{\nu s}$ будет наблюдаться почти синфазность, если отрицательна (3, 4) — противофазность. Независимо от того, движется волна в одну сторону со спутником (1, 4), или ему навстречу (2, 3)3), синфазность колебаний измеряемых составляющих V_{zs} и V_{ys} означает, что волна распространяется вправо от спутника, а их противофазность — влево от спутника. Нетрудно убедиться, что в перевернутой спутниковой моде это правило сохраняется. Таким образом, анализируя характер колебаний двух измеряемых в эксперименте WATS составляющих скорости, можно определить, к востоку или к западу движется АГВ.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Используя рассмотренные в предыдущем разделе способы определения направления движения АГВ, построим общую картину азимутов этих волн над обеими полярными шапками. Направление движения АГВ вдоль витка спутника DE2 (меридиональную составляющую) определяем по сдвигу фаз колебаний концентраций О и N₂, для проверки также анализируем синхронные профили вертикального смещения и измеренной составляющей скорости $V_{\rm sc}$. Направление движения АГВ перпендикулярно к вектору скорости спутника (вдоль параллели) определяем по синфазности или противофазности колебаний вертикальной и горизонтальной составляющих скорости. Комбинируя результаты по меридиональному и зональному направлениям, определим квадрант, в котором распространяется волна. Предполагая, что полярные АГВ связаны с авроральным источником, целесообразно представлять направления их движений в геомагнитных координатах. На орбитальный трек под углом 45° нанесем стрелку, начало которой совпадает с максимумом амплитуды волнового цуга, а величина соответствует амплитуде АГВ в составляющей V_{vs} . Результирующая картина преобладающих направлений движения АГВ для северной полярной области показана на



Рис. 4. Варианты распространения акустико-гравитационных волн относительно направления движения спутника в горизонтальной плоскости: в случаях 1, 2 регистрируются синфазные вариации колебаний измеренных составляющих V_{zs} и V_{ys} , в случаях 3, 4 — противофазные

рис. 5 справа: вверху — январь-февраль, внизу июнь — июль. В таком графическом представлении видны основные азимуты движения полярных АГВ, но информация о протяженности волновых цугов не отражается. Поэтому положение границ полярной волновой активности дополнительно показано на рис. 5 слева (по данным [4]). Дугой обозначено положение гипотетического источника в ночном секторе овала. В северном полушарии исследовано 35 витков с отчетливо выраженными 62 цугами АГВ в интервале высот 250—350 км. Анализируемые витки относятся к разным моментам UT и разному уровню геомагнитной возмущенности (в основном слабая и умеренная возмущенность).

В северном полушарии заметна общая тенденция закручивания азимутов АГВ против часовой стрелки (по вращению Земли). В положении границ цугов и азимутах движения АГВ заметны значительные сезонные отличия. В период полярной ночи (январь — февраль) АГВ группируются достаточно кучно внутри аврорального овала и почти не наблюдаются с его внешней стороны. Когда северная шапка освещена Солнцем (июнь — июль), заметно усиливается составляющая движения АГВ в направлении к $14-15^{h}$. С ночной стороны волны этой группы простираются далеко за пределы овала, вплоть до 20° геомагнитной широты, образуя своеобразный «хвост». В дневном секторе АГВ огра-



Рис. 5. Границы волновой активности (слева) и направления движения полярных АГВ (справа) в северном полушарии: вверху — январь — февраль 1983 г., внизу — июнь — июль 1982 г.

ничиваются геомагнитными широтами овала и никогда не достигают средних и низких геомагнитных широт.

Подобный анализ проводился для 53 волновых цугов в южном полушарии. Над южной полярной шапкой в целом наблюдается антисимметричная северному полушарию картина (рис. 6.) Также наблюдается тенденция циркулярного закручивания азимутов, но уже по часовой стрелке. Когда южная шапка освещена Солнцем (январь — февраль), помимо волн внутри овала, отчетливо проявляется составляющая движения АГВ в направлении примерно к 16^{*h*}. В июне июле АГВ располагаются в основном внутри



Рис. 6. Границы волновой активности (слева) и направления движения полярных АГВ (справа) в южном полушарии: вверху — январь — февраль 1983 г., внизу — июнь — июль 1982 г.

овала, а в январе — феврале наблюдается протяженный «хвост», как в северном полушарии.

Полученная картина преобладающих движений АГВ в целом почти симметрична над обеими полярными шапками. В обоих полушариях заметна тенденция закручивания азимутов АГВ вокруг полюсов по вращению Земли. Проявляются похожие сезонные отличия, наиболее интересное среди которых — ночные «хвосты», простирающиеся до низких геомагнитных широт. Поскольку эти АГВ движутся в направлении к авроральному овалу, непонятно их происхождение, скорее всего источники этих волн сосредоточены в средних или низких широтах. Среди



Рис. 7. Акустико-гравитационные волны в вариациях нейтральной концентрации (*a*) и скорость меридионального ветра (δ) по данным измерений на спутнике DE2. Горизонтальные стрелки указывают направления движения акустико-гравитационных волн и ветра, вертикальные стрелки — положение географических полюсов

отличий в разных полушариях можно отметить, что над южной шапкой АГВ располагаются менее кучно, чем над северной шапкой, а также в среднем имеют меньшие амплитуды.

СРАВНЕНИЕ АЗИМУТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С ВЕТРОМ

Вначале сравним направления движения АГВ и ветра вдоль вектора скорости спутника. На рис. 7 синхронно показаны волновые вариации нейтральной концентрации и скорость меридионального ветра на витке 8257. Положительное значение меридиональной составляющей скорости означает, что ветер и спутник движутся в одну сторону, а отрицательное — в противоположных направлениях. Поскольку орбита DE2 солнечно-синхронная с наклоном 89.9°, половину витка спутник находится в часовом поясе LT1, а другую половину в LT2 = LT1 \pm 12^{*h*}. На витке 8257 синхронизация орбиты соответствовала переходу ночь — день $(1.8-13.8^h)$ около северного полюса и день — ночь (13.8—1.8^{*h*}) вблизи южного полюса. Положение географических полюсов показано вертикальными стрелками: N — северного, S — южного. Направления движения АГВ и ветра показаны горизонтальными стрелками. Полярные ветры, как и следовало ожидать, направлены из дня в ночь, а АГВ, наоборот, распространяются из ночи в день. Преобладающее направление движения полярных АГВ из ночи в день проявляется систематически в разные времена года и в обоих полушариях [4].

Сравним направления движения АГВ и ветра перпендикулярно к вектору скорости спутника (вдоль параллели). На рис. 3 в прямой моде спутника, если зональный ветер положительный (выпуклость направлена вверх), наблюдается почти противофазность колебаний измеренных составляющих скорости V_{ys} и V_{zs} , а если ветер отрицательный — колебания близки к синфазным. Синфазный характер колебаний V_{ys} и V_{zs} указывает на движение в положительном направлении оси Z_s , а противофазный — в отрицательном направлении оси Z_s . На основе этого можно заключить, что на витке 8051 АГВ вдоль параллели движутся против ветра.

Подобный анализ был проведен для всех волновых цугов, представленных на рис. 5 и 6. Для всех полярных АГВ, как вдоль вектора скорости спутника, так и перпендикулярно к нему наблюдаются встречные движения волн и ветра. Сравнивая полученные азимуты полярных АГВ (правые части рис. 5 и 6) с рис. 1 из работы [14], где представлены измерения скорости ветра по данным того же спутника DE2, видим, что АГВ отчетливо выстраиваются вдоль направлений основных ветров, двигаясь при этом им навстречу.

Динамика полярной термосферы в основном определяется двумя ветровыми системами. Первая система — это ветры, обусловленные разогревом термосферы из-за поглощения солнечного ультрафиолетового излучения, дующие от послеполуденной области низких широт (от 14... 16 ч по местному солнечному времени). Вторая ветровая система связана с локальными авроральными источниками: возмущенный поток термосферной циркуляции направлен в основном от дневного каспа через геомагнитный полюс на ночную сторону. Наиболее полная на сегодня картина термосферной полярной циркуляции была получена на спутнике СНАМР [13]. В условиях полярной ночи и полярного дня вклад каждой из этих ветровых систем над обеими шапками различен. В период полярной ночи динамика полярной шапки в большей степени определяется локальным нагревом в каспе. Когда шапка освещена Солнцем, влияние глобального ветрового потока из низких широт на полярные области становится более существенным.

Все эти основные особенности динамики полярных ветров находят отражение в азимутах АГВ (рис. 5, 6). Для обоих полушарий в условиях полярной ночи волны в основном сосредоточены внутри авроральных овалов и их азимуты преимущественно определяются ветрами возмущенной полярной циркуляции. В периоды, когда шапки освещены Солнцем, усиливается поток АГВ навстречу ветру, дующему из области максимального разогрева термосферы, в результате чего и образуются «хвосты» в распределении АГВ.

выводы

На основе спутниковых измерений параметров нейтральной атмосферы исследована связь направлений движения среднемасштабных АГВ с ветром в полярной термосфере. Установлено, что азимуты АГВ систематически направлены против ветра. Этот эффект отчетливо проявляется как в меридиональном, так и в зональном направлении: вдоль меридиана полярные АГВ распространяются из ночи в день, а вдоль парал-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

лели — по вращению Земли. Таким образом, по данным прямых спутниковых измерений подтвердился эффект, обнаруженный ранее в наземных наблюдениях и свидетельствующий в пользу пространственной ветровой фильтрации АГВ [7, 17].

Наблюдается тенденция азимутов АГВ циркулярно закручиваться вокруг геомагнитных полюсов. При этом волны над полярными шапками группируются преимущественно по двум направлениям: 1) к магнитному полудню — навстречу ветру полярной циркуляции, направленного от ночного овала в сторону дневного каспа; 2) 14—16 ч — навстречу глобальному ветру, дующему из области низких широт. Относительный вклад этих потоков изменяется в зависимости от освещенности Солнцем полярной шапки, отражая различный характер динамики полярных ветров в периоды полярной ночи и полярного дня. В полярную ночь направления движения АГВ определяются преимущественно локальной полярной ветровой системой. Когда полярные шапки освещены Солнцем и усиливается ветер, дующий из низких широт, соответственно усиливается и составляющая движения АГВ навстречу этому ветру.

- 1. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
- 2. Федоренко А. К. Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — 14, № 3. — С. 254—265.
- 3. *Федоренко А. К.* Энергетический баланс акустикогравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2010. — **50**, № 1. — С. 111—122.
- Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — 51, № 4. — С. 527—539.
- Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., et al. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. – 1981. – 5. – P. 429–441.
- Cowling D.H., Webb H.D., Yeh K.C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere // J. Geophys. Res. – 1971. – 76. – P. 213–220.
- 7. Crowley G., Jones T. B., Dudeney J. R. Comparison of short period TID morphologies in Antarctica during geo-

magnetically quiet and active intervals // J. Atmos. Terr. Phys. – 1987. – **49**. – P. 1155–1162.

- Ding F., Wan W., Yuan H. The influence of background winds and attenuation on the propagation of atmospheric gravity waves // J. Atmos. Terr. Phys. – 2003. – 65. – P. 857–869.
- Hays P. B., Killeen T. L., Kennedy B. C. The Fabry-Perot interferometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. – 1981. – 5. – P. 395–416.
- Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – 38. – P. 1441–1481.
- Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res. – 1995. – 100. – P. 23993–24002.
- Killeen T. L., Won Y. I., Nicieyewski R. J., Burns A. G. Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies // J. Geophys. Res. 1995. 100. P. 21327–21342.
- Lühr H., Rentz S., Ritter P., et al.. Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP // Ann. Geophys. – 2007. – 25. – P. 1093– 1101. – (www.ann-geophys.net/25/1093/2007).
- Rees D., Fuller-Rowell T. J., Gordon R., et al. A comparison of wind observations of the upper thermosphere from the Dynamics Explorer satellite with the predictions of a global time-dependent model // Planet. Space Sci. 1983. **31**, N 11. P. 1299–1314.
- Spencer, N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., et al. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // Space Sci. Instrum. – 1981. – 5. – P. 417–428.

- Sun L., Wan W., Ding F., Mao T. Gravity wave propagation in the realistic atmosphere based on a three-dimensional transfer function model // Ann. Geophys. 2007. –
 P. 1979–1986. (www. ann-geophys.net/25/1979/2007).
- Waldock J. A., Jones T. B. HF Doppler observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed at mid latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. – 1986. – 48. – P. 245–260.

Надійшла до редакції 12.01.11

A. K. Fedorenko

PROPAGATION DIRECTIONS OF ACOUSTIC GRAVITY WAVES ABOVE THE POLAR CAPS OF THE EARTH

Propagation directions of middle-scale acoustic gravity waves (AGW) in the polar regions are investigated using the Dynamics Explorer 2 satellite data. It is found that the AGW above the polar caps are systematically propagated opposite to wind at altitudes of 250 to 350 km. The tendency for anti-clockwise rotations of AGW propagation directions is noticeable above the north polar cap and the tendency for clockwise rotations is observed above the south polar cap. The polar waves are gathered in the next main directions: 1) to the magnetic noon that is towards the wind of disturbed polar circulation; 2) to 15-16 hours of magnetic local time that is towards the global thermospheric wind blowing from low latitude regions. Under the polar day and polar night conditions the directions of AGW propagations are changed in the both hemisphere according to seasonal reconstruction of polar wind dynamics.

UDC 579.65

O. P. Burlak¹, O. M. Mikheev³, I. Ye. Zaets¹, J.-P. de Vera⁴, A. Lorek⁴, A. Koncz⁴, B. H. Foing⁵, N. O. Kozyrovska¹

¹ Institute of Molecular Biology & Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Institute of Cell Biology & Genetic Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴Institute of Planetary Science, DLR, Berlin, Germany

⁵ESA/ESTEC/SRE-S, postbus 299 NL-2200 AG, Noordwijk, The Netherlands

PHOTOSYSTEM II OF *KALANHOE DAIGREMONTIANA* SHELTERED BY BACTERIAL CONSORTIUM UNDER MARS-LIKE CONDITIONS

The maximum quantum yield of the photosystem II (F_v/F_m) and other parameters were measured in situ fluorometrically in Kalanhoe daigremontiana under simulated martian-like conditions (low atmospheric pressure, high CO₂ concentration, and UV irradiation of near-martian surface spectrum) in a Mars simulation chamber. We found no differences in F_v/F_m at hypobaria (10 mbar) and ambient pressure, as well as between treated with bacteria and control plants. However, a difference was seen between variants of kalanchoe exposed to CO₂ of a high concentration (95 %). The maximum quantum yield was higher in presence of bacteria, although F_v/F_m decreased in both variants (inoculated and noninoculated) under a high CO₂ concentration in the atmosphere, in contrast to low-pressure conditions. The F_v/F_m values for kalanchoe plants grown in martian regolith simulant or in earth soil under simulated martian conditions were lower than in the case of normal earth conditions. The positive effect of bacterial inoculation on plant accommodation to adverse simulated martian conditions was more pronounced for the kalanchoe plants grown in martian regolith simulant and depended on bacterial species, especially, under rigorous conditions of the joint action of low pressure, high content of CO₂, and UV irradiation. For K. daigremontiana plants treated with Klebsiella oxytoca, Methylobacterium sp., the photochemical quenching coefficient P and Stern-Volmer non-photochemical quenching coefficient NPQ were lower during diurnal and nocturnal periods as compared to the nontreated plants. This revealed some protection for PSII. The majority of bacterial strains and their consortium demonstrated protective effect in K. daigremontiana under abiotic stressors and after the impact of stressors, as distinct from arbuscular mycorrhiza fungi.

INTRODUCTION

Efficient plant growth in extraterrestrial greenhouses under low availability of nutrients and permanent resistance to stressful conditions (changed gravity and atmosphere composition, irradiation, etc) will be a vital problem in outposts. The ability of microorganisms, including resident endophytes, to confer stress tolerance to plants may provide a novel low cost strategy for mitigating the impacts of the environmental conditions outside the Earth in consistence with the concept of using microbial technology for plant growing/protosoil formation for lunar/martian greenhouses [13, 14, 19, 28].

Numerous studies on plant growth under low gravity led the to conclusion that plants tolerate low atmospheric pressure [6, 22, 25]. However, the response to hypobaria results in considerable changes in a gene expression pattern, including in genes involved in tolerance to dessication, indicating combating stress [22]. A water-deficit stress may inhibit plant growth under hypobaria. It is well known that CAM (Crassulation Acid Metabolism) plants normaly found in arid and semi-arid habitats possess a high water-use efficiency to adapt to water stress [26]. CAM-photosynthesis provides strong protection from photoinhibition during periods of high irradiance at midday by establishing a high internal CO₂ concentration as a result of organic acid decarboxylation in the leaves that can be used for further photochemical work [27]. CAM species show an average increase in biomass productivity

[©] O. P. BURLAK, O. M. MIKHEEV, I. Ye. ZAETS, J.-P. de VERA, A. LOREK, A. KONCZ, B. H. FOING, N. O. KOZYROVSKA, 2011

of 35 % in response to a doubled atmospheric CO_2 concentration. Increases in net daily CO_2 uptake by CAM plants under elevated atmospheric CO_2 concentrations reflect increases in both Rubisco-mediated daytime CO_2 uptake and phosphoenolpyruvate carboxylase mediated night-time CO_2 uptake, the latter resulting in increased nocturnal malate accumulation [9]. The performance of the CAM can be estimated measuring photosystem II (PSII) fluorescence with instruments.

The relationship between chlorophyll fluorescence and the overall process of photosynthesis are rather complicated, but it should be noted that the registration process of chlorophyll fluorescence of green leaf plants can be used for analysis of plants under the influence of stress in laboratory or field [17]. Chlorophyll fluorescence has proven to be a useful, non-invasive tool for the study of different aspects of photosynthesis, and for the quantification of any stress impact in plants [16]. Because a single leaf spot may not be representative for the whole leaf, two-dimensional chlorophyll fluorescence imaging instruments have been developed [4, 5]. Measuring the chlorophyll fluorescence emission with a pulse amplitude-modulated fluorometer showed that the plant growth-promoting soil bacterium Bacillus subtilis GB03 augments photosynthetic capacity by increasing photosynthetic efficiency and chlorophyll content in arabidopsis [29].

The main objectives of this study were:

(1) to evaluate photosynthetic activity (F_v/F_m) and other parameters measured *in situ* in kalanchoe leaves when exposed to martian-like conditions;

(2) to find out protective effect of rationally selected bacterial species and arbuscular mycorrhiza fungi on the kalanchoe plant grown in martian regolith simulant under near-Mars simulated conditions.

MATERIALS AND METHODS

The Experimental Mars simulation chamber (MSC) HUMULAB (DLR Berlin) was used for short-term experiments on *in situ* measurement of PA and other photochemical parameters with help of the MINI-PAM fiberoptical mounted in MSC. Technical parameters of MSC and a gas-mixing system, including mass flow controllers, are described well in [7].

Plant material and growth conditions. Five-monthold plants Kalanchoe daigramontiana Hamet & Perr (possessing 3-4 pairs of leaves) were grown in commercially available soil in plastic pots ($V = 200 \text{ cm}^3$) under controlled conditions (air temperature 25 °C, light irradiance 57.0 µmol quanta m⁻²s⁻¹ of the photosynthetically active radiation (PAR), humidity 70 %) with a 14/7 h day/night period. Martian regolith simulant (MRS) was purchased from Naturkundemuseum (Berlin). One-week before exposure to simulated martian conditions in MSC at the HUMU-LAB kalanchoe plants were inoculated, when needed, with either consortium of all bacterial strains or with any bacterial culture, separately. For this roots of individual plants were drown into diluted (with a sterile water) overnight bacterial cultures at titre of 10⁶ colony-forming units per ml within 30 min. One month before planting in MRS kalanchoe plants grew in soil inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi, when needed.

Inoculated plants were grown in the commercial soil, and three days before exposure to stressors the plants replanted in MRS, when needed. Plant samples were placed on a tiny stand within MSC. Plants were irradiated with LED light in an intensity of about 131.67 μ mol quanta m⁻²s⁻¹of PAR or subjected to irradiation of UV Xenon lamp with an optical collimation 10–150 W (DLR Berlin). 100 % atmospheric humidity and temperature 25 °C within a night-day period (8/16 h) were inside MSC.

Microbial species and culturing. Klebsiella oxytoca was grown in LB [21], *Paenibacillus* sp. in MZ [15], *Pseudomonas fluorescens.* in King's B [12], *Methylobacterium* sp. in M9 medium [21] with 1 % methanol during 18—24 hours at 28 °C. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Glomus intraradices* GV (kindly provided by H. Bothe, Cologne University) were accumulated in *Tagetes patula* L. roots, and the propagules were used in the experimental soils (10 %/v). Internal root colonization in kalanchoe was tested with standard lactophenol method [20].

Chlorophyll fluorescence analyses. Photosynthetic activity and other parameters of the PSII under simulated martian conditions were measured with the use of the pulse amplitude-modulated fluorometer MINI-PAM (Heinz WALZ GmbH, Effeltrich, Germany). To reach maximal fluorescence yield under modeled conditions, a light was switched off inside the MSC for 1 h within simulated "martian" day. The

ratio F_{v}/F_{m} ($F_{v} = F_{m} - F_{0}$) was used to estimate the potential quantum yield of PSII photochemistry of K. daigremontiana plants at night period in MSC. F_0 is minimal level of fluorescence measured on darkadapted leaves (in the dark-adapted state at nighttime in MSC). The maximal level of fluorescence in the dark-adapted state (F_m) was measured by a 1-s pulse of saturating light. The parameter Φ_{PSII} represents the actual quantum yield of PSII photochemistry for light-acclimated samples under illumination and was calculated $\Phi_{PSII} = (F_m' - F)/F_m'$ where *F* is the level of fluorescence just before the pulse of saturating light and F_m' is maximal light-adapted fluorescence was applied. The following parameters were calculated: coefficient of photochemical quenching $qP = (F_m' - F)/(F_m' - F_0')$; and quantum efficiency of non-photochemical dissipation in PSII complexes NPQ = $(F_m - F_m')/F_m'$. Outside the model Mars-like chamber we used chlorophyll fluorometer IMAG-ING-PAM, M-series (Heinz WALZ GmbH, Effeltrich, Germany) for measurement of PA (F_{y}/F_{m}) in leaves before and after exposure to simulated martian conditions. Before and after exposure to MSC under martian simulated conditions plants were adapted in a dark chamber within 1 h to gain maximal yield with the IMAGING-PAM instrument.

Statistical tests. Statistical tests of the significance of differences between means from two-three experiments were based on Student's *t*-test (p < 0.05).

RESULTS AND DISCUSSION

Photosynthetic activity of K. daigremontiana plantlets under model Mars-like conditions. Photosynthetic activity is an indicator of functionality of photosystem under simulated Mars-like parameters [8]. We studied the effect of simulated martian conditions on the PS II of K. daigremontiana five-month-old plants, as well as the potency of microorganisms to alleviate stress in plants. Earlier we showed that two defined bacterial strains promoting plant growth protected plants after acute irradiation with γ -quanta (⁶⁰Co) [2]. Actually, the reduction of F_{v}/F_{m} is based on damage of the PS II as a result of stress [23], and priming plants with microbes could rise effectivity of defensive system to withstand stresses or may lead either to direct interaction with the photosystem II, or change its regulation indirectly.

In initial experiments five days before exposure to Mars-like conditions the plants were inoculated with the bacterial consortium composed with K. oxytoca and Paenibacillus sp. and grew in local soil. Directly before experiment samples received 1 ml water and were fixed in MSC under fiberoptics of MINI-PAM fluorometer. The levels of F_v/F_m under impact of independent stress factors or their combination were measured with this device. The first experiment involved the simulation of low pressures reached stepby-step 10 mbar (near-martian pressure) during 24 hs, beginning from 1013 mbar (earth pressure) (Fig. 1a). There was no significant effect of a pressure drop from normal to the martian surface conditions on the photosynthetic activity of kalanchoe plants. These results are in agreement with recent data of Tang et al. [25] on photosynthetic rate calculated for lettuce grown under low pressure. F_v/F_m of other photosynthesizing organism - lichen - demonstrated the same tendency under low atmospheric pressure [7]. The plant treated by bacteria had higher activity of the PS II at daytime then in the night.

Next experiments involved step-by-step increasing CO₂ from 0.03 % (earth conditions) to 95 % CO₂ (near-martian surface conditions) (Fig. 1b) and combination of low preassure and CO₂ concentration at 45 % or 95 % under LED light (Fig. 1c). At high CO, concentration quantum yield of the K. daigremontiana PS II decreased sharply to 0.1 e.u. in noninoculated plantlets and to 0.25 in treated ones. The same tendency observed in F_v/F_m value of lichens in experiments conducted in MSC by de Vera and coauthors [7]. The application of high CO₂ concentration resulted in protection of PS II by the bacterial consortium. Under cooperative action of both stressors F_{v}/F_{m} was approximately 0.65; this value was a 6-fold higher than when only high CO₂ concentration applied and comparable with yield under low pressure. We can assume that the negative impact of high content of CO₂ in atmosphere balanced with low atmospheric pressure. Under these conditions, when PSII was not impaired heavily, protective effect given by bacteria was not so pronounced during a daytime, as compared separate action of CO₂ and low pressure. Our results have proven data of Paul and others [22] that hypoxia and hypobaria to be different stressors, effecting different plant systems. Bacterial impact on plant defensive system appeared to be



Fig. 1. Photosynthetic activity (F_v/F_m) of the *Kalanchoe daigremontiana* plants grown in the earth soil under low pressure (*a*) or high CO₂ concentration (*b*), as well as in combination of low pressure and high CO₂ concentration (*c*). Kalanchoe plants inoculated with a dual bacterial consortium of *Paenibacillus* sp. and *Klebsiella oxytoca*, when needed



Fig. 2. Photosynthetic activity (F_v/F_m) before and after martian conditions of the *Kalanchoe daigremontiana* plants grown in the earth soil (*a*) and Mars-simulated soil (*b*). *Error bars* indicate the SD of the means (n = 2 for *a* and n = 3 for *b*). Kalanchoe plants treated with various bacterial strains. Plants lighted with LED (PAR) and UV irradiated during a day-night period inside Mars simulation chamber

different under these stressors, and there was a trend to decreasing the maximum quantum yield in the night in inoculated kalanchoe variants where low pressure was simulated (Fig. 1a, c).

Contribution of individual bacterial strains in protection of kalanchoe (LED). It is well known that bacteria capable to influence plant physiology under normal conditions; for example, *B. subtilis* enhances photosynthetic activity in arabidopsis plants [29]. Our objective was to find out what model bacterial species makes a positive contribution to the protection of kalanchoe under/after abiotic stresses in order to know more about mechanisms of plant protection mediated by microbes. The maximum yield in dark-adapted plants grown in the fertile soil recorded with the IMAGING-PAM instrument before exposition to martian-like conditions and after 24 hours. On Fig. 2a protective effects of *Paenibacillus* sp., *Pseudomonas fluorescens, Methylobacterium* sp. and *K. oxytoca,* as well as consortium of all bacterial strains used are seen under a partialy simulated martian conditions, but not of AM-fungi. The latter was surprising, because it was expected that AM had a potency to improve a water supply in the plant and to alleviate so far a water-deficit stress in kalanchoe under low atmospheric pressure. In the low-pressure environment water is pulled out through the leaves very quickly, and so extra water is needed to replenish it. Probably, kalanchoe does not loose water so quickly due to CAM-type of photosynthesis, and a role of AM fungi in such a case (a short-term experiment) was overestimated.

Contribution of individual bacterial strains in protection of kalanchoe (UV). In next experiments kalanch-

oe plants were exposed to more rigorous conditions: UV irradiation of near-Mars spectrum and growth in mineral soil stimulant (MRS) of low bioavailability were added to low pressure and high concentration of CO₂. Before exposure to MSC K. daigremontiana plants were inoculated with different bacterial species, when needed, or used kalanchoe specimens colonized with AM fungi for independent measurements. Both treated with microbes and control plants were grown during three days under low availability of plant-essential nutrients. In MSC one half samples were exposed to LED light and others were under UV irradiation: both sets of specimens mounted inside the chamber during a day-night period. The F_v/F_m value in kalanchoe plants exposed to mentioned conditions declined approximately five-times as compared to normal conditions, and under UV it was 2-time lower then under LED (Fig. 2b). Inoculation of kalanchoe plants with K. oxytoca, Paenibacillus sp., P. fluorescens, and Methylobacterium sp. resulted in improving $F_{\rm u}/F_{\rm m}$ value after simulated martian conditions. The yield in kalanchoe plants inoculated with Methylobacterium sp. practically did not change after exposure to low pressure, high concentration of CO₂, UV and deficit of nutrients. AM fungi had no effect on kalanchoe F_v/F_m under stressful conditions.

Maximum quantum efficiency of PSII photochemistry and other parameters of kalanchoe under stress. Using the MINI-PAM fiberoptical mounted in the Mars-like camera we were able to measure maximal quantum yield of PS II and other parameters such as photochemical quenching coefficient (qP), Stern-Volmer non-photochemical quenching (NPQ) in kalanchoe plants grown in MRS under simulated Mars-like conditions. Published results demonstrate that with the increase of light intensity the quantum yield of the PS II decreases and the NPQ-value was higher at diurnal than at nocturnal period [11] indicating photoinhibition effect [18]. F_v/F_m reflects the maximum efficiency at which light absorbed by lightharvesting antennae of PSII is converted to chemical energy and decrease the values indicating in particular the phenomenon of inhibition when the plant has been exposed to stress, and in water-stressed K. daigremontiana leaves F_{v}'/F_{m}' decreased, and NPQ increased [10]. High value-NPQ may represent a mechanism of dissipating excess of excitation energy and down-regulate photosynthetic electron transport so that production of ATP and NADPH would match the decreased CO_2 assimilation. Increase of *qP* indicated a better production of ATP and NADPH and incorporation of the latter in antioxidant and CO_2 fixing systems of plant [3].

In situ chlorophyll fluorescence measurement under stressful low pressure and high concentration of CO_2 in the experimental camera showed positive impact of *Methylobacterium* sp. treatment on kalanchoe plants expressed in higher F_v/F_m value at a day-time (Fig. 3a). In contrast, treatment plants with *K. oxytoca* led to decrease of F_v/F_m value under the same conditions. However, treatment with *K. oxytoca* resulted in significantly higher the maximum quantum yield in kalanchoe leaves compared to untreated plants under high concentration of CO_2 in atmosphere and normal pressure at a day-time. In both cases effect of bacteria was associated with influence on the photosynthetic reactions associated with PSII.

To get detailed information of participation of endophytes in photorespiratory process in kalanchoe under stresses, some parameters of PSII were measured within the experimental facility *in situ*. The photochemical quenching coefficient (qP) in untreated plants outside of the facility was the highest, especially in lighted with LED plants (Fig. 3 b). This supposes the intense flow of electrons through the electron transport chain of PSII and synthesis of ATP and NADPH. These processes consume relatively less ATP than does photosynthesis.

On the other side, increase of qP indicates a better production of ATP and NADPH and incorporation of the latter in antioxidant and CO₂-fixing systems of the plant. In MSC the treated with Methylobacterium sp. and K. oxytoca specimens had lower qP within both diurnal and nocturnal periods then in untreated plants. These values approached to control's ones under normal conditions (Fig. 3 b). In normal conditions the beet plants inoculated with endophytes exhibited higher value of qP than noninoculated plants [24]. In case of untreated kalanchoe sharp increase of qP was a reaction of the kalanchoe PSII on the stress and a loss of effective energy needed for a defensive reaction. Given that the light in the chamber was identical and constant flux quanta was constant (there was no photoinhibition effect of light) under



Fig. 3. The maximum quantum yield (F_v/F_m) at nocturnal period and effective quantum yield Φ_{PSII} at daytime period (*a*), photochemical quenching coefficient (*qP*) (*b*), Stern-Volmer non-photochemical quenching (*NPQ*) (*c*) under simulated martian conditions (low atmosphere pressure or ambient pressure, high concentration 95 % of CO₂, low availability of nutrients in the substrate). Kalanchoe plants were treated with *Klebsiella oxytoca* or *Methylobacterium* sp. or left untreated under ambient conditions and inside of Mars simulation clamber. Plants lighted with LED (PAR) only during a day under Mars-like simulations. Chlorophyll fluorescence was measured inside Mars-like facilty with the MINI-PAM fluorometer. In column average significance of 6 measurements (every 30 min) over the past three hours of a day-night period is represented. Asterisks indicate significant difference between the treatments and corresponding control (untreated) inside Mars simulation chamber by Student's *t*-test (* indicate P < 0.05). Error bars was 0.0 in most cases

high concentration of CO_2 , it can be assumed that the photochemical quenching was enhanced in untreated plants by the intensive use of recovered molecules of ATP and NADPH under abiotic stress.

Endophyte-inoculated beet plants exhibited higher value of qP than noninoculated plants [24]. In case of untreated kalanchoe sharp increase of qP was a reaction of the *Kalanchoe* PSII on the stress and a loss of effective energy needed for a defensive reaction.

It was earlier reported that the coefficient *NPQ* was higher at diurnal than at nocturnal period in stressed kalanchoe plants [10, 11]. *In situ* chlorophyll fluorescence measurement in kalanchoe leaves under both stressors in the facility showed a growing *NPQ*, in contrast to control plants outside of MSC. High value-*NPQ* may represent a mechanism of dissipating excess of excitation energy and of down-regulation of a photosynthetic electron transport in such

a way that production of ATP and NADPH would match the decreased CO₂ assimilation. NPQ transforms into heat the excess of light energy that cannot be used in photosynthesis and which could lead to ROS (Reactive Oxygen Species) formation. The pHand xanthophyll-dependent conformational change and the PsbS protein are necessary for NPO, but the actual biophysical mechanism of Chl de-excitation is still unknown. Both qP and NPQ could help to minimize production of singlet oxygen formed in PSII. In our experiments K. daigremontiana plants treated with Methylobacterium sp. had higher NPQ within both diurnal and nocturnal periods than control untreated plants within MSC (Fig. 3 c). The inhibition of both NPQ and qP during simulated martian day in K. daigremontiana plants treated with K. oxytoca may suggest that there is another mechanism of protective potency in this bacterium under multi-factor stress (Fig. 3 b, c). In another study the quantum yield of non-photochemical dissipation in PSII complexes was reduced by *B. subtilis* GB03 volatiles [29], indicating improved electron transport downstream from PSII. Different modes of changes in photochemical and non-photochemical parameters in kalanchoe leaves in response to stressful conditions displayed different putative mechanisms of protection of PSII with bacteria.

In all phases of photosynthesis in the light period (Phases II to IV) CAM plants are subjected to oxidative stress and perform photorespiration. Vigorous photosynthetic CO, assimilation due to high internal CO₂ concentration behind closed stomata in Phase III also generates high internal O₂ concentrations. Chlorophyll triplets are known to readily react with oxygen to produce very reactive oxygen species. Photoinhibitory process leads to impairment of PSII electron transport, especially under stresses. The activation of plant ROS-detoxification system by bacteria, including resident endophytes, may be a way to protect plants from toxic effects of ROS. We may assume that the associated bacteria that have their own ROS-eliminating systems could complement the deficient antioxidative systems of the plant.

In summary, effect of bacteria was associated with a day-time phases of PSII activity and appear reflected increase in Rubisco-mediated daytime CO, uptake and was not relevant to PEPC-mediated night-time CO, uptake. It is possible to assume that the protective role of Methylobacterium sp. manifested by both improving photorespiration (the stimulation of ATP and NADPH molecules by K. daigremontiana under model stressful conditions) and in a priming of plant defense system. Protecting mechanism provided by K. oxytoca in kalanchoe plants grown under multifactor stress plus a poor supply of essential nutrients in the system may be explained with improved electron transport downstream from PSII, as well as a supply of the plant partner with biological nitrogen and growth stimulators, leading to general strengthening a plant-host. Probably, tested bacteria possess the mechanism of quick utilization of excessive light energy that causes photooxidative effect, for example, utilization of ATP and NADPH either directly or via endophytic endemics, assissting in decreasing $\Phi_{_{PSII}}$ in kalanchoe leaves and preventing photooxidation of PSII. On the other hand, both species are able to activate antioxidative systems [13]. We can assume that due to these bacteria elimination of ROS that actively formed in leaf tissues in stressful conditions occurred more efficiently than in untreated plants, and this process may protect photosynthetic centers.

This work was supported within the frame of the Ukrainian-German projects 2009–2010/BMBF-UKR 08/039 and M/431-2009.

- 1. *Ardanov P., Ovcharenko L., Zaets I., et al.* Endophytic bacteria enhancing growth and disease resistance of potato (*Solanum* tuberosum L.) // Biocontrol. 2011. **56**, N 1. P. 43–49.
- Burlak O. P., Lar O. V., Rogutskyy I. S., et al. A bacterial consortium attenuates the low-dose gamma-irradiation effect in *Kalanchoe* plantlets // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya (Space Sci. Technol.). – 2010. – 16, N 2. – P. 75–80.
- 3. *Cao J., Govindjee R.* Chlorophyll a fluorescence transient as an indicator of active and inactive photosystem II in thylakoid membranes // Biochem. Biophys. acta. 1990. **1015**, N 2. P. 180–188.
- 4. *Chaerle L., Hagenbeek D., De Bruyne E., et al.* Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage // Plant and Cell Physiol. 2004. **45**, N 7. P. 887–896.
- Chaerle L., Valcke R., Van Der Straeten D. Imaging techniques in plant physiology: from simple to multispectral approaches // Advances in Plant Physiology / Ed. by A. Hemantaranjan. — Jodhpur: Sci. Publs, 2002. — P. 135—155.
- Corey K. A., Barta D. J., Wheeler R. M. Toward Martian agriculture: responses of plants to hypobaria // Life Support Biosph. Sci. – 2002. – 8, N 2. – P. 103–114.
- 7. *de Vera J-P., Möhlmann D., Butina F., et al.* Survival potential and photosynthetic activity of lichens under Marslike conditions: a laboratory study // Astrobiology. 2010. **10**, N 2. P. 215—227.
- de Vera J.-P., Tilmes F., Heydenreich T., et al. Potential of prokariotic and eukariotic organism in a Mars like environment and as reference system for the search of life on other planets // Proceeding of DGLR Int. Symp. To the Moon and beyond (14–16 March, Bremen). — Bremen, 2007. — available as CD.
- Drennan P. M., Nobel P. S. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations // Plant, Cell and Environment. – 2000. – 23, N 8. – P. 767–781.
- Guralnick L. J., Heath R. L., Goldstein G. Fluorescence quenching in the varied photosynthetic modes of *Portulacaria afra* (L.) Jacq. // Plant Physiol. – 1992. – 99, N 4. – P. 1309–1313.

- Herzog B., Grams T. E., Haag-Kerwer A., et al. Expression of modes of photosynthesis (C3, CAM) in *Clusia criuva* Camb. in a Cerradol gallery forest transect // Plant Biol. – 1999. – 1, N 3. – P. 357–364.
- King E. O., Ward M. K., Raney D. E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // J. Lab. and Clin. Med. – 1954. – 44, N 2. – P. 301–307.
- Kozyrovska N. O., Korniichuk O. S., Voznyuk T. M., et al. Microbial community in a precursory scenario of growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya (Space Sci. Technol.). – 2004. – 10, N 5/6. – P. 221–225.
- Kozyrovska N. O., Korniichuk O. S., Voznyuk T. M., et al. Growing pioneer plants for a lunar base // Adv. Space Res. – 2006. – 37. – P. 93–99.
- Kozyrovska N., Negrutska V., Kovalchuk M. Paenibacillus sp., a promising candidate for development of a novel technology of plant inoculant production // Biopolym. Cell. – 2005. – 21, N 4. – P. 312–319.
- Krause G. H., Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics // Annu. Rev. Plant Physiol. – 1991. – 42. – P. 313–349.
- Lichtenthaler H. K., Rinderle U. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants // CRC Critical Reviews in analytic Chemistry. – 1988. – 19. – P. 29–85.
- Liu J.-Y., Qiu B.-S., Liu Z.-L., Yang W-N. Diurnal photosynthesis and photoinhibition of rice leaves with chlorophyll fluorescence // Acta Bot. Sinica. – 2004. – 46, N 5. – P. 552–559.
- Lytvynenko T., Zaetz I., Voznyuk T. M., et al. A rationally assembled microbial community for growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // Res. Microbiol. – 2006. – 157. – P. 87–92.
- Maneval W. E. Lacto-phenol preparations // Stain Technology. 1936. 11, N 1. P. 9–11.
- Miller J. H. Experiments in Molecular Genetics. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1972. — 432 p.
- Paul A.-L., Schuerger A. C., Popp M. P., et al. Hypobaric biology: Arabidopsis gene expression at low atmospheric pressure // Plant Physiol. – 2004. – 134, N 1. – P. 215– 23.
- Rintamaki E., Salo R., Lehtonen E., Aro E.-M. Regulation of D1-protein degradation during photoinhibition of photosystem II *in vivo*: phosphorilation of the D1-protein in various plant groups // Planta. — 1995. — 195, N 3. — P. 379—386.
- Shi Y., Li C. Growth and photosynthetic efficiency promotion of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) by endophytic bacteria // Photosynth. Res. – 2010. – 105, N 1. – P. 5–13.
- Tang Y., Guo S., Dong W., et al. Effects of long-term low atmospheric pressure on gas exchange and growth of lettuce // Adv. Space Res. – 2010. – 46, N 6. – P. 751–760.
- 26. *Ting I. P.* Crassulacean acid metabolism // Annu. Rev. Plant Physiol. 1985. **36**. P. 595–622.

- Winter K., Demmig B. Reduction state of Q and non-radiative energy dissipation during photosynthesis in leaves of a crassulacean acid metabolism plant, *Kalanchoe daigremontiana* Hamet et Perr // Plant Physiol. 1987. 85, N 4. P.1000–1007.
- Zaets I., Burlak O., Rogutskyy I., et al. Bioaugmentation in growing plants for lunar bases // Adv. Space Res. – 2011. – 47, N 6. – P. 1071–1078.
- 29. Zhang H., Xie X., Kim M.-S., et al. Soil bacteria augment Arabidopsis photosynthesis by decreasing glucose sensing and abscisic acid levels in planta // Plant J. – 2008. – 56, N 2. – P. 264–273.

Received 20.01.11

О. П. Бурлак, О. М. Міхєєв, І. Є. Заєць, Ж.-П. де Вера, А. Лорек, А. Конч, Б. Фоїнг, Н. О. Козировська

ЗАХИСТ ФОТОСИСТЕМИ II *KALANHOE DAIGREMONTIANA* БАКТЕРІЙНИМ КОНСОРЦІУМОМ У МОДЕЛЬНИХ МАРСІАНСЬКИХ УМОВАХ

За допомогою флуорометра було виміряно in situ максимальний квантовий вихід $\Phi C II (F_v/F_w)$ та інші параметри Kalanhoe daigremontiana в імітованих марсіанських умовах (низький атмосферний тиск, висока концентрація CO₂ і $У\Phi$, за спектром близький до марсіанського) у марс-симуляційній камері. В умовах зниженого (10 мбар) і звичайного тиску не виявлено відмінностей у максимальній ефективності ФС II рослин, у тому числі інокульованих бактеріями. Однак спостерігалася відмінність між варіантами каланхое в умовах високої концентрації СО, (95 %). Максимальний квантовий вихід був вищим у присутності бактерій, хоча при високій концентрації СО, в атмосфері він знижувався в обох варіантах (інокульованих і неінокульованих), на відміну від F_{ν}/F_{m} при низькому тиску. Величина F_v/F_m рослин каланхое, вирощених у штучному марсіанському ґрунті (MRS) або земному ґрунті за штучно створених марсіанських умов, була нижчою, ніж у звичайних земних умовах. Позитивний вплив від інокуляції бактеріями на пристосування рослин до несприятливих модельних марсіанських умов був більш виражений у рослин каланхое, вирощених на MRS, і залежав від виду бактерій, особливо в жорстких умовах спільної дії низького тиску, високого вмісту СО, і УФ-опромінення. Рослини K. daigremontiana, оброблені Klebsiella oxytoca та Methylobacterium sp., мали нижчий коефіцієнт фотохімічного гасіння qP і коефіцієнт нефотохімічного гасіння Штерна — Фольмера NPQ в денний і нічний період порівняно з необробленими рослинами, виявивши протекторний механізм. Більшість бактеріальних штамів і їхній консорціум продемонстрували протекторний ефект на K. daigremontiana за дії абіотичних стресорів, на відміну від арбускулярних мікоризних грибів.

УДК 581.133.1:535.361.2

С. М. Кочубей, Т. А. Казанцев

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕРИВАТИВНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗ КОСМОСА

Вивчено можливість використання деривативних вегетаційних індексів для моніторингу рослинності на основі гіперспектральних вимірювань з борту космічного супутника. За допомогою імітаційних моделей «грунт — рослинність» проведено розрахунки деривативною вегетаційного індексу D_{725}/D_{702} з використанням спектральних кривих відбиття листків. Показано, що зниження спектрального розділення до 10 нм, що відповідає максимальним відомим на сьогодні значенням для супутникових сенсорів, не викликає істотних змін індексу D_{725}/D_{702} . При повному проективному покритті ґрунту рослинністю відхилення його величини від значень, отриманих при розділенні 1 нм, знаходяться в межах 2—7 % при варіаціях концентрації пігменту в широкому діапазоні. У разі неповного проективного покриття відхилення не перевищують 16 % для найбільш несприятливого випадку: проективне покриття ґрунту 25 %, низький вміст хлорофілу і високе відбиття ґрунту. Теоретичне обґрунтування інформативності індексу D_{725}/D_{702} при зниженому спектральному розділенні підтверджено результатами аналізу даних спектрального сенсора Нурегіоп, встановленого на борту супутника ЕО-1. Встановлена висока кореляція між відбиттям в зеленій області спектрів посівів пшениці, присутніх на знімку, і концентрацією хлорофілу, розрахованою за індексом D_{725}/D_{702} .

Растительность — один из важнейших объектов, которые подлежат дистанционным исследованиям и контролю. Фотосинтетический аппарат растений является чувствительным индикатором состояния растений, что обусловлено быстрыми изменениями содержания пигментов, в первую очередь хлорофилла, в ответ на изменения параметров окружающей среды. Форма спектра отражения растительности в видимом диапазоне определяется в основном спектральными характеристиками хлорофилла, что открывает возможность создать высокоинформативные методы дистанционного зондирования состояния растительности. Так называемые «хлорофильные индексы» широко используются для оценки различных параметров, в том числе оценки продуктивности агроценозов [1]. На основе данных о содержании хлорофилла в листьях оценивается обеспеченность растений азотным питанием [6, 8]. В решении экологических задач оценки хлорофилла могут быть использованы для раннего обнаружения факторов риска, например утечки газа или нефти из продуктопроводов [13], радиационного загрязнения территорий [7].

В настоящее время используются два типа индексов для оценки хлорофилла. Это либо комбинации спектральных коэффициентов яркости, либо так называемые деривативные вегетационные индексы, которые рассчитываются как отношение амплитуд при двух длинах волн в графиках первой производной от контура спектра отражения. Последние имеют ряд существенных преимуществ, позволяющих создать надежную базу для дистанционного мониторинга состояния фитоценозов. Основным преимуществом является крайне слабая чувствительность индексов к вкладу отражения от почвы. Было показано, что при 25 % проективном покрытии

[©] С. М. КОЧУБЕЙ, Т. А. КАЗАНЦЕВ, 2011

почвы растительностью с низким содержанием хлорофилла отклонение данных его оценки от варианта 100 % покрытия не превышает 10 % даже при высокой отражательной способности почвы [3, 4, 11].

Известны различные деривативные индексы, отличающиеся выбором длин волн, для которых проводятся расчеты отношения амплитуд в графиках первой производной [5, 9, 12-14]. Создание метода оценки хлорофилла по деривативным индексам налагает ряд требований на выбор такого индекса. К их числу относится устойчивость к помехам, например возникающим при вариациях формы спектра отражения в зависимости от содержания хлорофилла в растениях. Возникает необходимость обеспечить такую процедуру вычисления, чтобы получить наиболее простой алгоритм оценки хлорофилла. Деривативный индекс должен быть приемлемым для работы с различными видами растений. Как было показано нами, наилучшим образом этим требованиям удовлетворяет индекс D_{725}/D_{702} [10], который представлен отношением амплитуд в графике первой производной при λ = 725 и 702 нм. Этот индекс может быть использован для оценки хлорофилла в растениях различных видов, и в отличие от предложенного ранее [5, 9] его вычисление не требует поиска экстремумов в графике первой производной, что упрощает алгоритм расчета.

Успешные испытания в полевых условиях предложенного нами метода дистанционной оценки хлорофилла на основе индекса D_{725}/D_{702} [2] позволяют поставить вопрос о приемлемости его для измерений с борта космических спутников. Для этого необходимо проверить работоспособность метода при использовании гиперспектральной аппаратуры, разрешающая способность которой не превышает 10 нм. В данной работе с помощью имитационных моделей были оценены отклонения величины индекса $D_{_{725}}/D_{_{707}}$, рассчитанного по спектральным кривым с разрешением $\Delta \lambda = 10$ нм, по сравнению с его значениями, полученными при разрешении $\Delta\lambda = 1$ нм. Расчеты проведены для системы «почва — растительность» с различными параметрами, такими как величина проективного покрытия, концентрация хлорофилла, отражательная способность почвы. Теоретически обоснованная возможность использования такого индекса была подтверждена с помощью анализа гиперспектральных данных, полученных сенсором «Hyperion», установленным на спутнике EO-1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для теоретических расчетов использовали спектры отражения листьев озимой пшеницы, измеренные с разрешением 1 нм с помощью модифицированного лабораторного спектрофотометра С Φ -10 как описано ранее [10]. Исходные спектральные кривые трансформировались к разрешению 10 нм. По исходным и трансформированным спектрам строились графики их первых производных, как описано ранее [10], и рассчитывались значения индекса D_{725}/D_{702} . Аналогичные вычисления были проведены по спектрам отражения модельных систем «почва — растительность», имитирующих неполное проективное покрытие. Модели таких систем были организованы в лабораторных условиях с использованием листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла и почвы с существенно различающейся отражательной способностью — чернозем и светлый песок [3, 4].

Анализ гиперспектрального снимка, полученного сенсором «Hyperion» со спутника EO-1 и откорректированного на пропускание атмосферы, проводили следующим образом. С помощью компьютерной программы ENVI было построено 3-канальное изображение в цветовой модели RGB сцены размером 10.5×7.62 км, на котором есть сельскохозяйственные посевы. Представление объектов сцены в натуральных цветах позволило выбрать 10 фрагментов посевов с различающейся интенсивностью зеленой окраски, от светло- до темно-зеленой. Согласно модели RGB цвет каждого пикселя представлен суперпозицией красного, зеленого и синего цвета с разными уровнями светимости. Относительные величины светимости для каждого цвета, нормируются от 0 до 255. Величины в «зеленом» канале для выбранных фрагментов



Рис. 1. Графики первой производной спектра отражения листьев озимой пшеницы (концентрация хлорофилла — 8.08 мг/дм²), построенные по спектральным кривым, соответствующим разрешениям $\Delta \lambda = 1$ нм (*a*) и 10 нм (*б*)

изображения использовались в качестве меры интенсивности зеленого цвета. В дальнейшем они будут называться «значение G-канала». Так же с помощью ENVI конвертировались спектры отражения пикселей в формат ASCII для дальнейших расчетов вегетационного индекса согласно алгоритму, разработанному нами ранее [10].

Для каждого из 10 выбранных фрагментов посевов был получен усредненный спектр отражения, для которого построен график первой производной, рассчитан вегетационный индекс D_{725}/D_{702} , и с помощью процедуры [10] получена оценка содержания хлорофилла. Для выбранных фрагментов также были вычислены средневзвешенные «значения G-канала» в программе Adobe Photoshop CS4 и затем рассчитана корреляция между этими величинами и оценками содержания хлорофилла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены графики первых производных спектров отражения листьев озимой пшеницы, записанных с различным спектральным разрешением. Как видно, уменьшение разрешения приводит к сглаживанию деталей тонкой структуры.

В табл. 1 приведены значения D_{725}/D_{702} для листьев с различным содержанием хлорофилла, рассчитанные по спектральным кривым отражения с различным разрешением. Из таблицы следует, что отклонения величины D_{725}/D_{702} , вызванные снижением спектрального разрешения, не превышают 7 %. Поэтому можно считать, что спектры отражения, измеряемые гиперспектральной аппаратурой с разрешением 10 нм с борта спутника, вполне приемлемы для количественной оценки хлорофилла.

Известно, что основной проблемой, существенно искажающей результаты дистанционных измерений растительности, является неполное проективное покрытие почвы растительностью [3]. В связи с этим были проанализированы отклонения деривативного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектрам отражения модельных систем «почва — растительность», имитирующих различное проективное покрытие, по сравнению с его значениями, отвечающими варианту полного проективного покрытия и разрешению 1 нм. Модели составляли из листьев озимой пшеницы с высокой, средней и низкой концен-

Таблица 1. Влияние спектрального разрешения спектрометра на расчетную оценку индекса $ДИ = D_{725}/D_{702}$ (спектральные кривые, соответствующие низкому разрешению, имитированы с помощью спектров листьев озимой пшеницы, измеренных при разрешении 1 нм)

Концентрация хлорофилла, мг/дм ²	Δλ, HM	$ДИ = D_{725}/D_{702}$	ДИ ₁₀ /ДИ ₁ *
8.08	1	1.41	0.98
	10	1.39	
4.47	1	0.71	1.03
	10	0.73	
1.50	1	0.43	1.07
	10	0.46	

* — отношение значений ДИ при разрешениях $\Delta \lambda = 10$ и 1 нм

трацией хлорофилла. Фоном служила черноземная почва с низким отражением 5—10 % в спектральном диапазоне 680—750 нм, используемом для измерений, и светлая песчаная, для которой коэффициент отражения составлял от 20 до 50 % в указанном диапазоне. Результаты расчетов индекса D_{725}/D_{702} по спектрограммам таких систем приведены в табл. 2.

Видно, что наиболее высокие отклонения величины индекса от значений, полученных по спектрограммам с высоким разрешением, проявляются в случае низкого содержания хлорофилла. Максимальное отклонение 16 % соответствует самому неблагоприятному случаю проективное покрытие 25 % на фоне светлой почвы при низком содержании хлорофилла. Следует отметить, что основной причиной увеличения отклонения является не пониженное спектральное разрешение, а искажение формы спектра отражения, вызванное вкладом отраже-

Таблица 2. Отклонения величины деривативного вегетационного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектральным кривым с разрешением 10 нм, от величины, определяемой по кривым с разрешением 1 нм в моделях «почва — растительность» с неполным проективным покрытием почвы

Концентрация хлорофилла, мг/дм ²	Грунт	Проективное покрытие, %	$ ДИ = D_{725}/D_{702} $	ДИ ₁₀ / ДИ ₁ *
8.08	Чернозем	50 25	1.38 1.37	1.03 1.04
	Светлый песок	50 25	1.34 1.24	1.06 1.12
5.67	Чернозем	50 25	1.03 1.06	0.96 0.93
	Светлый песок	50 25	1.02 1.02	0.97 0.97
2.90	Чернозем	50 25	0.60 0.63	0.91 0.86
	Светлый песок	50 25	0.61 0.64	0.89 0.84

* — отношение значений индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанных для модельных систем по спектрограммам с разрешением $\Delta \lambda = 10$ нм, и рассчитанных по спектрограммам с разрешением $\Delta \lambda = 1$ нм, соответствующих полному проективному покрытию





Рис. 2. a — снимок, полученный сенсором «Hyperion» с борта спутника EO-1 (1—10 — номера фрагментов, выбранных для анализа); δ — усредненные спектры отражения, соответствующие некоторым фрагментам

ния почвы. Как было показано ранее, такие искажения спектра приводят к отличиям индекса D_{725}/D_{702} около 10 % по сравнению с оценками при полном проективном покрытии и в случае использования спектральных данных, полученных при разрешении 1 нм [3, 4].

Таким образом, теоретический анализ, проведенный для самых различных систем «почва растительность», показывает, что метод деривативных индексов дает вполне удовлетворительные результаты для оценки хлорофилла по спектрам отражения, измеренным спектральной аппаратурой с разрешением 10 нм.

Для проверки этого заключения проведен анализ данных, полученных спектральным сенсо-



Рис. 3. Зависимость значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по снимку «Hyperion» для фрагментов 1–10 от значений канала G

ром «Нурегіоп» с борта спутника ЕО-1. Значения деривативного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанные для 10 фрагментов изображения сельскохозяйственных посевов, сопоставляли со «значениями G-канала» этих фрагментов (рис. 2). Отражение света растительностью в зеленой области спектра зависит от содержания хлорофилла. Коэффициент отражения более высокий при меньшем содержания пигмента [6], поэтому такие участки на цветном изображении будут выглядеть светло-зелеными. В пределах одного снимка в условиях одинакового освещения интенсивность зеленой окраски объекта может быть использована как относительный показатель концентрации хлорофилла.

Рис. 3 демонстрирует взаимосвязь между оценкой хлорофилла, рассчитанной с помощью индекса D_{725}/D_{702} по спектрам отражения фрагментов посевов, и интенсивностью зеленой окраски этих фрагментов на изображениях — «значениями G-канала». Обнаруживается тесная корреляция между этими величинами.

Таким образом, теоретические расчеты и предварительная экспериментальная проверка показывают, что разработанный нами деривативный вегетационный индекс может быть использован для количественной оценки содержания хлорофилла в растительности по космическим снимкам, полученным с помощью гиперспектральной аппаратуры с разрешением не хуже 10 нм. Следует отметить, что такой подход выдвигает весомую альтернативу используемым в настоящее время методам оценки хлорофилла по космическим измерениям, например с применением NDVI-индексов. Это обусловлено прежде всего тем, что для вычисления деривативных индексов не нужно нормировать спектры к эталону 100 % отражения. Кроме того, в отличие от методов, использующих спектральные коэффициенты яркости, в частности NDVI-индексы, наш метод может вполне уверенно работать с разреженными посевами, например на ранних стадиях вегетации или рядковыми посевами.

Также следует отметить, что использование одного и того же алгоритма расчетов для гиперспектрального снимка и наземных измерений с помощью разработанного нами полевого спектрометра, снабженного GPS-датчиком, обеспечивает надежную основу для разработки технологии валидации космических данных.

- Андрианова Ю. Е., Тарчевский И. А. Хлорофилл и продуктивность растений. — М.: Наука, 2000. — 135 с.
- 2. *Казанцев Т. А., Туменок Л. В., Кочубей С. М.* Дистанционные измерения динамики содержания хлорофилла в посевах озимой пшеницы // Физиол. и биохим. культурных растений. — 2010. — **42**, № 6. — С. 544—549.
- 3. *Кочубей С. М.* Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом діапазоні // Космічна наука і технологія. — 2003. — **9**, № 5/6. — С. 185—190.
- 4. Кочубей С. М., Казанцев Т. А., Донец В. В. Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности // Космічна наука і технологія. 2008. 14, № 3. С. 69—74.
- 5. *Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М.* Количественный анализ формы спектральных кривых отражения листьев растений как способ тестирования их состояния // Физиол. и биохим. культурных растений. 1988. **20**, № 6. С. 535—539.
- Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990. — 136 с.
- Davids C., Tyler A. N. Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone // Remote Sens. Environ. – 2003. – 85, N 1. – P. 30–38.
- Graeff S., Claupein W. Quantifying nitrogen status of corn (Zea mays L.) in the field by reflectance measurements // Eur. J. Agron. – 2003. – 19, N 4. – P. 611–618.

- Kochubey S. M., Bidyuk P. I. Novel approach to remote sensing of vegetation // Proc. of SPIE. — 2003. — 5093. — P. 181–188.
- Kochubey S. M., Kazantsev T. A. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content // J. Plant Physiol. - 2007. - 164, N 12. - P. 1648-1655.
- Kochubey S. M., Yatsenko V. A. Monitoring system for agricultural crops on chlorophyll basis // Proc. of SPIE. – 2003. – 5232. – P. 92–99.
- Lamb D. W., Steyn-Ross M., Schaares P., et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass // Int. J. Rem. Sens. – 2002. – N 23. – P. 3619–3648.
- Smith K. L., Steven M.D., Colls J. J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red edge region to identify plant stress responses to gas leaks // Remote Sens. Environ. – 2004. – 92. – P. 207–217.
- Zarko-Tejada P. J., Miller J. R., Morales A., et al. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops // Remote Sens. Environ. – 2004. – 90. – P. 463–476.

Надійшла до редакції 07.01.11

S. M. Kochubei, T. A. Kazantsev

THE USE OF DERIVATIVE VEGETATION INDICES FOR THE ESTIMATION OF CHLOROPHYLL CONTENT IN VEGETATION ON THE BASIS OF SATELLITE DATA

The possibility to use derivative vegetation indices for the monitoring of vegetation on the basis of satellite hyperspectral measurements is studied. Soil-vegetation models are employed to calculate the derivative vegetation index D_{725} / D_{702} with the use of reflectance spectra of leaves. It is shown that a decrease in spectral resolution down to 10 nm, which corresponds to the maximum value for satellite hyperspectral sensors, causes no significant changes in the D_{725}/D_{702} value. Variations of the index lay in the range from 2 to 7 % in the case of full soil covering and do not exceed 16 % for the most complicated model configuration which is 25 % soil covering, a low chlorophyll content and a high soil reflectance. The results are tested practically by analyzing the spectral image of wheat crops obtained with the hyperspectral sensor Hyperion onboard the satellite EO-1. A high correlation is revealed between the reflectance in the green region of the spectra of the wheat crops from the image and the chlorophyll content calculated with the use of the D_{725}/D_{702} index.

УДК 621.37.+551.553.5

Ф. И. Бушуев¹, Н. А. Калюжный¹, А. П. Сливинский^{1, 2}, А. В. Шульга¹

¹ Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв ² Український радіотехнічний інститут, Миколаїв

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ FM-СТАНЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ

По сигнальной информации FM-передатчиков проведен анализ количества наблюдаемых сигналов, отраженных от метеоров, в зависимости от их времени жизни. Полученная статистика согласуется с ранее известными статистиками, что позволяет надеяться на возможность успешной селекции метеоров по сигналам FM-передатчиков. Разработана методика восстановления аналога амплитудно-временной характеристики (ABX) по спектру сигнала FM-радиостанции. Методика основана на использовании амплитудной модуляции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на метеорном следе, которая приводит к пропаданию сигнала на выходе FM-приемника при отношениях сигнал/помеха на его входе меньших нижнего порога частотного демодулятора. Такое предположение было экспериментально подтверждено на примере временной развёртки сигнала польской FM-радиостанции, отраженного от недоуплотненного следа короткоживущего метеора. В свою очередь положение первого локального максимума спектральной плотности сигнала на выходе FM-приемника обратно пропорциональна времени между первой и второй зонами Френеля, что позволяет оценивать скорость метеора по спектру сигнала FM-передатчика. При наблюдении с 10 по 23 июня 2010 г., по всплескам спектральной плотности выделялись сигналы польской FM-радиостанции, определялись максимумы спектральной плотности и по положению первого локального максимума спектральной плотности и по положению первого локального максимума оценивались скорости метеоров. Временная последовательною сигнала быть скорость метеора постакального максимума оценивались скорости метеоров. Временная последовательной сплотности и по положению первого локального максимумы спектральной плотности и по положению первого локального от метеора, является важным отличительным признаком и может быть использована для разработки алгорита автоматического распознавания метеоров по сигналу FM-радиостанции.

введение

Наряду с традиционными оптическими методами, радиолокационные методы являются мощным дополнительным современным средством изучения метеоров, позволяющим наблюдать метеоры круглые сутки. С этой целью применяются радиолокаторы обратного рассеяния радиоволн (BS-радары). В настоящее время широкому использованию BS-радаров в исследовательских целях препятствуют большие эксплуатационные затраты. В связи с появлением огромного числа TV- и FM-передатчиков, наиболее перспективным направлением исследований представляется наблюдение метеоров с помощью радаров, рассеивающих вперёд (FS-радаров). Привлекательность направления состоит в простоте используемых технических средств и приемлемом объёме финансовых затрат, доступных в том числе и на широком любительском уровне исследований. Радионаблюдения метеоров незаменимы при изучении дневных метеорных потоков, а также потоков, активность метеоров в которых очень кратковременна. С помощью FS-радаров может решаться задача исследования метеорной активности.

При измерении амплитуды сигнала несущей частоты должно проводиться построение амплитудно-временной характеристики (ABX) сигнала, отраженного от метеора [10]. Сама по себе ABX является ярким объективным признаком сигнальной информации, который характеризует феномен отражения радиоволны от ионизированного следа метеороида. В случае изучения потоков метеорного вещества обнаружение

[©] Ф. И. БУШУЕВ, Н. А. КАЛЮЖНЫЙ, А. П. СЛИВИНСКИЙ, А. В. ШУЛЬГА, 2011

метеора должно обеспечиваться одновременно в трёх разнесенных пунктах. При этом в каждом из пунктов должно проводиться измерение временных задержек отраженного сигнала, имеющего интерференционные вариации ABX, относительно базового пункта. По результатам этих измерений возможно определение радиантов отдельных метеоров [4]. В последние десятилетия бурно развивается высококачественное радиовещание на основе FM-передатчиков, когда вариации частоты несущей излучаемого сигнала пропорциональны амплитуде полезного звукового сигнала, что обеспечивает высокую помехозащищённость и высокое качество воспроизведение звука во время FM-приема. Однако при этом теряется возможность определения АВХ сигнала, отраженного от метеора, без специальной переделки приемного тракта, используя лишь стандартный выход FM-приемника. В то же время с помощью программного обеспечения, доступного в интернете, возможно осуществление спектрального анализа этого сигнала с выхода частотного детектора, то есть непосредственно со стандартного выхода FMприемника. Ниже излагается метод восстановления аналога ABX в результате анализа особенностей распределения спектральной плотности сигнала FM-передатчика, отраженного от метеора и прошедшего частотную демодуляцию в тракте FM-приемника.

1. СТАТИСТИКА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ ПО СИГНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ FM-РАДИОСТАНЦИЙ

Согласно имеющемуся в настоящее время представительному объёму экспериментальных данных, полученных на BS-радарах, длительности времени жизни подавляющего большинства наблюдаемых радиометеоров лежат в интервале от 20 до 500 мс. На рис. 1 показано распределение относительного количества *N* наблюдаемых метеоров по значениям их времени жизни согласно данным [6]. Наблюдения осуществлялись в северной Швеции с помощью BS-радара SKiYMET в 2005 г.

Видно, что подавляющее большинство радиоотражений, наблюдаемых с помощью BS-радара SKiYMET, относятся к короткоживущим следам спорадических метеоров со временами распада, попадающими в указанный выше интервал 20-500 мс. На рис. 1 треугольниками представлена аналогичная статистика, полученная в результате обработки принимемой в НИИ НАО сигналов радиовещательного FM-передатчика мощностью 120 кВт, расположенного в Кельце (Польша) и излучающего на частоте 88.2 МГц частотномодулированый сигнал (см. http://fmscan.org). Прием сигналов метеорных отражений производился на шестиэлементную антенну горизонтальной поляризации типа «волновой канал». Для получения статистики стандартный выход встроенного в персональный компьютер TV/ FM-тюнера типа VideoMate был подключен к линейному входу звуковой карты этого же ПК. Радиоотражения от метеоров идентифицировались оператором по всплескам спектральной плотности сигнала на выходе частотного детектора FM-приемника. Оценка спектральной плотности сигнала, подаваемого на вход звуковой карты ПК, осуществлялась с помощью свободно распространяемой программы Spectrum-Lab (http://freenet-homepage.de/dl4yhf/spectra1. html), которая в качестве метода оценки спектра использует дискретное преобразование Фурье

Рис. 1. Распределения наблюдаемого относительного количества N метеоров (в процентах от максимального значения) по значениям их времени жизни, полученные по данным BS-радара SKiYMET [6] (линия) и по данным наблюдений в НИИ НАО сигналов от FM-передатчика (треугольники).



ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3



Рис. 2. Геометрия облучения следа метеороида (*a*) и иллюстрация происхождения френелевских осцилляций (б)

(ДПФ). Статистика, представленная на рис. 1 треугольниками, получена при следующих параметрах ДПФ: частота дискретизации 11025 Гц, объем выборки 1024. При этом темп оценки спектра был выбран равным половине длины импульсной характеристики ДПФ и составлял 46 мс. Наблюдения проводились в течение трех суток с 29 июня по 01 июля 2010 г. Хорошее соответствие статистик позволяет надеяться на успешную селекцию сигналов, отраженных от метеоров, по сигнальной информации FM-передатчиков.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ МЕТЕОРА ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ РАССЕЯНИЯ

Определение скоростей метеоров представляет интерес для наблюдаемости процесса абляции метеороида, определения плотности атмосферы [8] и характера дробления метеороидного тела. Кроме того, знание скорости метеороидов является важной информацией для оценки их масс. В процессе полёта метеороида при разогреве тела метеороида до температур 1800 К [1] начинается процесс абляции на высотах $70\div100$ км за счёт ударного столкновения с ионами O₂ и N₂ атмосферы. Так как потенциаль ионизаций химических элементов Ca, Fe, Mg, Si и Na в составе метеороидов, плазма следа метеора состоит главным образом из ионов этих элементов.

На рис. 2, *а* показана геометрия облучения следа метеора, передатчик расположен в точке *I*, приёмник — в точке *2* на расстояниях \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 от первой зоны Френеля соответственно. Здесь же представлена схема бегущих по следу метеора зон Френеля, размером s(t), с условным обозначением на нём светлых зон Френеля (**w**) и разделяющих их тёмных полос (**b**), образованных за счёт интерференции.

В соответствии с рис. 2, *а* можно записать: $\mathbf{r}_1' + \mathbf{r}_2' = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{s}(t)$,

или

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} + \mathbf{s}(t) \quad \mathbf{H} \left| \mathbf{R}' \right| \approx R + \frac{s^2(t)}{R}. \tag{1}$$

Размер *s* можно определить из приближенных условий накладываемых на размер первой зоны Френеля, когда центр её виден на расстоянии \mathbf{r}_1 от передатчика и \mathbf{r}_2 от приёмника под углом 2 ϕ между \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 :

$$|\mathbf{r}_{1}' + \mathbf{r}_{2}'| = |\mathbf{r}_{1} + \mathbf{r}_{2}| + \lambda / 2$$
,

где λ — длина волны излучения. Для общего случая, когда отличен от нуля угол β между осью следа и плоскостью распространения, имеется приближенная связь [3]:

$$s^2 \approx \lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)}$$

Согласно (1) мощность сигнала, отраженного от метеора, будет содержать множитель $\left|\int ds \exp(iks^2 / R)\right|^2$, где $k = 2\pi / \lambda$, *i* — мнимая единица. После замены переменной

$$s(t) \approx x(t) \left[\lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \right]^{1/2}$$
 (2)

интегрирование по новой переменной x формально проводится по всей длине следа от $-\infty$ до головы метеора x_0 . В результате для мощности

отраженного сигнала *P*_{ип/оv} от недоуплотнённых или от переуплотненных следов метеороидов получаем [12]

$$P_{un/ov}(t) = P_{un/ov}(0) \left(\frac{C^2(t) + S^2(t)}{2} \right), \qquad (3)$$

где *С* и *S* хорошо известные из классической теории дифракции интегралы Френеля:

$$C(t) = \int_{-\infty}^{x(t)} \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx ,$$
$$S(t) = \int_{-\infty}^{x(t)} \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx ,$$

а $P_{un/ov}(0)$ — мощность отражения от линейного следа метеороида.

Переменная x(t) связана естественным образом с соответствующим динамическим параметром — скоростью V пролёта метеором френелевских зон:

$$x(t) = Vt \left[\frac{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)}{\lambda r_1 r_2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где нулевой момент времени t выбирается при достижении метеором точки зеркального отражения. Уравнение (3) позволяет представить качественную картину временной зависимости мощности отраженного от недоуплотненного либо переуплотненного следа метеороида. На рис. 2, δ представлены временные осцилляции мощности без учёта амбиполярной диффузии.

Если известен размер зон Френеля, скорость метеора может быть определена по измерению частоты осцилляций, представленных на рис. 2, δ . Положения *n*-х границ зон Френеля зависят от длины волны и геометрии отражения. Согласно (2) *s*(*n*) можно записать в виде

$$s(n) = \left[n\lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2} = \left[n\lambda \frac{\mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2}.$$
 (5)

Если Δt_{nm} — время перемещения метеора из точки s(n) в точку s(m), то из выражения (5) можно получить известную формулу для скорости метеора V [12]:

$$V = \frac{m^{1/2} - n^{1/2}}{\Delta t_{nm}} \left[\frac{\lambda \mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2}$$

В частности, для главного дифракционного максимума (m = 1, n = 0) получим

$$V = \frac{1}{\Delta t_{01}} \left[\frac{\lambda \mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \right]^{1/2}.$$
 (6)

Следовательно, для оценки скорости метеора необходимо знание временного интервала Δt_{01} и координат точки зеркального отражения от метеора, с помощью которых вычисляется множитель в квадратных скобках (6). Время Δt_{01} может быть определено из записи профиля мощности сигнала, отраженного от ионизированного следа метеороида, если скорость записи достаточно высока (порядка 1000 тактов в секунду). Таким образом, по известным координатам зеркальной точки отражения от метеороидного следа скорость метеороида оценивается с помощью выражения (6). Следует отметить, что форма осцилляций Френеля может искажаться неоднородностями в ионизации следа, торможением метеороида и диффузией его следа.

На рис. 3 приведены графики изменения во времени мощностей $P_{un}(t)$ и $P_{ov}(t)$ сигналов, отраженных от недоуплотнённых и переуплотнённых следов метеороидов соответственно. Представленные профили были получены на FS-радаре RAMSES (Radio Meteor Survey, Extended System) в Бельгии [12]. В качестве передатчика служила восточно-европейская вещательная радиостанция, излучающая на частоте 66.39 МГц. Скорость записи сигнальной информации проводилась с частотой 200 тактов в секунду. На обоих графиках отчетливо видны френелевские осцилляции.

3. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ АНАЛОГА ABX ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕТЕОРОВ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ FM-РАДИОСТАНЦИЯМИ

Как уже отмечалось, в связи с появлением достаточно большего числа TV- и FM-передатчиков, наиболее перспективным направлением представляется наблюдение метеоров с помощью рассеивающих вперёд радаров. С появлением



Рис. 3. Экспериментальные профили мощностей сигналов $P_{un}(t)$ (*a*) и $P_{ov}(t)$ (*b*), отраженных от недоуплотнённых и переуплотнённых следов метеороидов соответственно [12]

FM-передатчиков с большими мощностями излучения увеличивается объём контролируемого пространства. Начиная с 1980-х гг., среди любителей метеорной астрономии все более популярными становятся пассивные методы регистрации метеорных сигналов в радиодиапазоне (88-108 МГц). В это же время появились многочисленные любительские программы спектральной обработки сигналов FM-станций. После доработки приемных TV- и/или FM-устройств в части регистрации амплитуды несущей возможно определение АВХ сигнала, отраженного от следа метеороида, в качестве основного отличительного признака. Предлагаемая нами методика не требует доработок приемных устройств и основана на использовании амплитудной модуляции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на движущемся метеорном следе.

Известно, что при уменьшении отношения сигнал/помеха (Q) на входе частотного демодулятора ниже определенного значения, называемого нижним порогом, зависимость ошибки демодуляции от Q становится нелинейной, а именно, ошибка резко возрастает при незначительном уменьшении Q [2]. Величина этого порога по разным оценкам может составлять 5—8 дБ [5] и даже 20 дБ [9]. Оценки отношения сигнал/ помеха на входе FM-приемника, расположенного в Николаеве и принимающего на частоте 88.2 МГц FM-радиостанцию Кельце, показали, что в самом благоприятном случае переуплотненного следа метеора с линейной плотностью электронов в следе 10¹⁴ м⁻¹, расположенного в плоскости распространения электромагнитной волны $(\beta = 0^{\circ})$, величина Q < 35 дБ. При другой ориентации следа и плоскости распространения ($\beta > 30^\circ$) Q < 25 дБ. Оценки мощности сигнала при этом проводились с использованием соотношений, которые даны в работе [7], а измеренное значение уровня помех составило величину 0.5 мкВ. Таким образом, даже в самом благоприятном случае мощность сигнала на входе FM-приемника может быть ниже верхнего порога ограничения, которому по нашим оценкам соответствует $Q > 30 \, \text{дБ}$. Для большинства же метеоров следует ожидать, что величина Q находится вблизи или меньше нижнего порога частотного демодулятора.

Дополнительные потери при частотной демодуляции могут возникать за счет изменения структуры принимаемого сигнала в интерференционных минимумах, когда отражения от наиболее плотных участков метеороидого следа компенсируют друг друга, а общий уровень сигнала обуславливается отражениями от более размытых, диффузных участков следа, что приводит к большему искажению сигнала. Следовательно, при отношениях сигнал/помеха, меньших нижнего порога, во время прохождения **b**-полос зон метеорного следа, показанных на рис. 2, б, должно наблюдаться практически полное пропадание сигнала FM-передатчика на выходе частотного демодулятора, т. е. сигнал будет проявляться в виде чередований появлений и пропаданий, иными словами должен представлять собой временную последовательность импульсов, в соответствии с последовательностью интерференционных максимумов. Моделирование такого процесса можно провести по наблюдаемым данным на примере спектральной обработки картин отражения, приведенных на рис. 3. Очевидно, что такая процедура тождественна спектральному анализу временной последовательности мощности сигнала отраженного от следа метеороида, которая описывается выражением типа (4), зависящим от интегралов Френеля.

Отрезок времени T = 200 мс (с t = 1 по t = 1.2 с), на который (см. рис. 3, *a*) пришлась основная мощность сигнала $P_{un}(t)$, был разбит на $N_{\rm T} = 101$ значений (точек), или на $(N_{\rm T} - 1)$ интервалов длительностью $\Delta t = T/(N_{\rm T} - 1) = 2$ мс. Пусть \tilde{P}_{un} — мощность отраженного сигнала на выходе частотного демодулятора. Последовательность $\tilde{P}_{un}(i)$ в точках i = 0, $(N_{\rm T} - 1)$ полагалась равной либо исходной экспериментальной мощности $P_{un}(i)$, либо уровню помех, если точка *i* попадала в область интерференционного минимума. В качестве оценки уровня помехи при этом использовалась средняя мощность, наблюдавшая-



Рис. 4. Экспериментальные (тонкие линии) и синтезированные по ним (точки) числовые последовательности мощности FM-сигналов, отраженных от недоуплотнённого (*a*) и от переуплотнённого (*b*) следов метеороидов, а также соответствующие синтезированным последовательностям диаграммы распределения по фильтрам плотности спектральной мощности сигналов (*б* и *c*)

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3



Рис. 5. Осциллограмма сигнала польской FM-станции, отраженного от метеора, полученная 25 мая 2010 г. в 22:19 UT

ся до появления отраженного сигнала. То есть, предполагается, что в интервале времени, соответствующем интерференционным минимумам, отраженный от метеора сигнал FM-передатчика на выходе частотного демодулятора пропадает вследствие следующих причин, которые упоминались выше: а) понижения уровня сигнала и б) изменений структуры сигнала. Синтезированная таким образом последовательность с учётом полного пропадания сигнала FM-передатчика (уменьшением до уровня помехи) в соответствии с интерференционной картиной показана на рис. 4, *а* точками, а исходная экспериментальная последовательность $P_{ux}(t)$ — тонкой линией.

На рис. 4, б приведено фурье-преобразование от синтезированной последовательности $\tilde{P}_{un}(i)$ длиной $N_{\rm T}$ в виде распределения спектральной плотности мощности сигнала \tilde{S}_{un} , отраженного от недоуплотнённого следа метеороида. Ширина полосы анализа по частоте составляет величину $f_{dis} = 1/\Delta t = 500$ Гц, а ширина фильтра равна $\Delta f = f_{dis}/N_{\rm T} = 5$ Гц. В соответствии с данными, представленными на рис. 4, б, главный максимум спектральной плотности синтезированного сигнала $\tilde{P}_{un}(i)$ находится в фильтре f_{12} , центральная частота которого равна $F = f_{12} =$ $= 12\Delta f = 60$ Гц. Этой частоте F = 60 Гц соответствует временной интервал $1/F \approx 17$ мс. С другой стороны, согласно рис. 3, а и рис. 4, а (точки), время между первыми интерференционными пиками примерно равно 16 мс. Этот факт указывает на возможность рассматривать последовательность, подобную представленной на рис. 4, а (точки), в качестве аналога ABX, а спектральную картину сигнала FM-радиостанции, отраженного от метеора и прошедшего частотную демодуляцию, можно рассматривать в качестве аналога спектра ABX и, в частности, использовать для оценки скорости метеороида. Для сигнала, отраженного от переуплотненного следа метеороида, на основе наблюдательных данных (рис. 3, б), была выполнена аналогичная процедура синтеза аналога ABX ($\tilde{P}_{ov}(i)$) и оценки его спектра. Полученная временна последовательность $\tilde{P}_{av}(i)$ и ее спектр \tilde{S}_{av} приводятся на рис. 4, *в* (точки) и рис. 4, *г* соответственно. В этом случае $N_{\rm T} = 120$, $\Delta t = 1.687$ мс, $f_{dis} = 1/\Delta t = 593$ Гц, ширина фильтра $\Delta f = 4.98$ Гц. Локальный максимум, согласно рис. 4, г, находится в фильтре с номером 5, следовательно, этому максимуму спектральной плотности на частоте $F = 5 \cdot 4.98 = 24.9$ Гц, соответствует временной интервал $\Delta t_{01} = 1/F \approx 40$ мс, что совпадает со значением Δt_{01} , которое можно определить непосредственно по графику рис. 3, б или рис. 4, в (тонкая линия).

4. МЕТОД ОЦЕНКИ СКОРОСТИ МЕТЕОРА ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕТЕОРОВ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ FM-РАДИОСТАНЦИЯМИ

Таким образом, временная последовательность сигнала FM-передатчика при отражении от метеороидного следа должна представлять собой последовательность импульсов, подобных представленным на рис. 4, *a* (точки) и 4, *в* (точки), каждый из которых может быть модулирован в соответствии со звуковыми частотами речевых, либо музыкальных фонем.

На рис. 5 приводится типичный снимок осциллограммы на интервале времени длиной 500 мс с сигналом польской FM-станции, отраженным от короткоживущего (~200 мс) следа метеороида.

Из данных, представленных на рис. 5, следует, что сигнал, отраженный от короткоживущего метеороидного следа, действительно представляет собой чередование появлений и пропаданий, как и на синтезированных временных последовательностях, приведенных на рис. 4, а (точки) и рис. 4, в (точки). Кроме того, одинаковый ход огибающих на рис. 4, а и рис. 5 указывает на то, что экспериментально наблюдаемый сигнал сформировался на недоуплотненном метеороидном следе. Следовательно, фурье-преобразование сигнала FM-станции имеет простую интерпретацию в качестве аналога фурье-преобразования АВХ как способа определения скорости метеороида. Необходимо отметить, что наблюдаемая на рис. 5 временная последовательность является важным отличительным признаком метеора и может быть использована для разработки алгоритма автоматического обнаружения метеороидного следа.

Для непосредственной приближенной оценки скорости метеороида положим, что зеркальная точка отражения от метеороидного следа принадлежит направлению, на котором реализовался максимум спектральной плотности. Для этого направления по экспериментальному положению первого локального максимума спектральной плотности определяем значение частоты *F*. Согласно (6) в пренебрежении угловыми зависимостями можно записать

$$V = F(\lambda \mu)^{1/2} \tag{7}$$

Пользуясь свойством зеркальности точки отражения, известным расстоянием *D* до FM-передатчика и известным значением высоты *h* точки отражения, будем полагать, что малая полуось *b* эллипсоида, в плоскости которого происходит отражение от следа метеороида, слабо отличается от высоты *h*, так что $b \approx h + \Delta h$. В свою очередь, большая полуось *a* эллипсоида связана с *b* и *D* соотношением $a^2 = b^2 + D^2/4$. С использованием канонического уравнения эллипса $x^2/a^2 + h^2/b^2 = 1$ и определений $r_{1,2} = a \pm \varepsilon x$, $\varepsilon = D/(2a)$ выражение для µ примет вид

$$\mu = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \approx \frac{D}{4} \sqrt{1 + \frac{4h}{D^2} \left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right)} \times \left\{ 1 - \frac{2\Delta h}{h} \left[1 - \frac{4h}{D^2} \left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right) \right] \right\}.$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

В допущении *D* >> *h*, µ можно оценивать с помощью приближенного выражения

$$\mu \approx \frac{D}{4} \left(1 - \frac{2\Delta h}{h} \right). \tag{8}$$

Выражение (8) при подстановке в (7) позволяет получить приближенную оценку скорости метеора:

$$V \approx \frac{F}{2} \sqrt{\lambda D} \left(1 - \frac{2\Delta h}{h} \right). \tag{9}$$

Следует отметить, что из выражения (9) вытекает существенное ограничение для F, обусловленное верхним экспериментальным пределом скорости метеора $V \approx 80$ км/с.

5. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Типичный снимок с экрана монитора распределения спектральной плотности для короткоживущего следа метеора приводится на рис. 6, *а*. Как и в случае определения количества наблюдаемых метеоров в зависимости от их времени жизни, для оценки спектральных характеристик принимаемых сигналов использовалась программа SpectrumLab, позволяющая в текущем времени осуществлять оценку спектра сигнала и запись на жесткий диск компьютера изображений спектральной плотности в виде, представленном на рис. 6.



Рис. 6. Снимки с экрана монитора распределения спектральной плотности сигнала польской FM-станции, отраженного от короткоживущего (a) и от долгоживущего (b) следа метеороида



Рис. 7. Суточная динамика значений скоростей метеороидов (*V*): *a* — по данным BS-радара SKiYMET [11], *б* — полученная НИИ НАО по сигнальной информации FM-станции в Кельце (88.2 МГц)

Спектральные плотности, приведенные на рис. 6, а, получены при следующих параметрах ДПФ: частота дискретизации 11025 Гц, объем выборки 16384, что соответствует ширине фильтра $\Delta f = 0.71$ Гц. При этом темп оценки спектра был выбран равным половине длины импульсной характеристики ДПФ и составлял 0.743 мс, а ширина полосы анализа равнялась 1 кГц. На основании этого под короткоживущими следами метеороидов здесь подразумеваются такие, для которых время жизни $\tau < 0.7$ с. На рис. 6, *а* интервал времени между пунктирными линиями составляет 60 с. Наблюдения проводились в пункте регистрации НИИ НАО по сигнальной информации FM-передатчика расположенного в Кельце на расстоянии $D \approx 1000$ км от Николаева. В частности, согласно экспериментальным данным, приведенным на рис. 6, а, первый локальный максимум пришёлся на частоту $F \approx 80$ Гц. Для польской FM-радиостанции при $\Delta h \approx 10$ км коэффициент при F в выражении (9) приближенно будет равен $\sqrt{\lambda D} (1 - 2\Delta h/h) \approx 0.7$, тогда для приближенной оценки скорости метеороида получим $V \approx F \cdot 0.7$ км = 56 км/с.

С увеличением времени жизни метеороидного следа (до десятков секунд), покадровая картина

распределения локальных максимумов спектральной плотности от события к событию может сильно отличаться. На рис. 6, б представлена динамика распределения локальных максимумов спектральной плотности для долгоживущего метеора, при тех же параметрах обработки, как и в случае данных, приведенных на рис. 6, а. Картину распределения локальных максимумов спектральной плотности сигнала, подобную представленной на рис. 6, б, можно объяснить эффектом деления массы метеороида. Действительно, при наличии деления метеороидного тела типа квазинепрерывного отделения мелких частиц [1] геометрия отражения такова, что отраженный сигнал формируется за счёт последовательного влёта частиц дробящегося метеороидного тела в одну и ту же область пространства. В этом случае следует ожидать многократного повторения от такта к такту оценок спектра сигнала FMстанции, и тогда значение *F* можно определять по положению первого локального максимума спектральной плотности в любом такте. Разумеется, столь приближенные оценки не совсем адекватны наблюдательным данным, однако могут отражать качественную картину суточного распределения скоростей метеороидов.

На интервале времени с 10 по 23 июня 2010 г. по сигнальной информации FM-станции в Кельце (88.2 МГц), спектры сигналов визуально отбирались по типам, которые подобны представленным на рис. 6. При этом для лучшего соответствия спектральной обработки наиболее вероятному значению времени жизни метеоров (см. рис. 1), объем выборки для ДПФ был задан равным 2048, а темп оценки спектра — 93 мс, что составлет половину длины импульсной характеристики ДПФ. Приближенная оценка скоростей в соответствии с (9) проводилась на основе выражения $V \approx 0.7 \cdot F$. На рис. 7 представлены почасовые значения оценок скоростей V.

Из данных, приведенных на рис. 7, следует хорошее качественное согласие статистик скоростей метеороидов, полученных с помощью BS-радара [11] и с помощью предложенной методики оценки скорости по сигнальной информации FM-радиостанций.

Следует отметить, что как для BS-, так и FS-радаров оценивается проекция полной скорости метеороида на направление наблюдения. Для оценки полной скорости необходимы одновременные многопозиционные наблюдения метеороидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлекательность метода измерений отраженных от метеоров сигналов FM-радиостанций состоит в возможности использования унифицированных приёмников, доступного программного обеспечения и простых антенных систем. В связи с этим правомерна постановка вопроса о создании круглосуточной службы регистрации метеоров, оценки их физических параметров и определения радиантов метеоров. Определение количества наблюдаемых сигналов, отраженных от метеоров, в зависимости от их времени жизни показало их удовлетворительное согласие с наблюдениями на BS-радарах, что позволяет надеяться на возможность успешной селекции сигналов отраженных от ионизированных следов метеороидов по сигнальной информации FM-передатчиков.

Разработана методика восстановления аналога ABX по спектру сигнала FM-радиостанции, отраженного от метеора. Методика основана на использовании амплитудной модуляции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на метеорном следе, которая приводит к пропаданию сигнала на выходе FMприемника при отношениях сигнал/помеха на его входе, меньших нижнего порога частотного демодулятора. Такое предположение было экспериментально подтверждено на примере временной развёртки сигнала польской FM-радиостанции, отраженного от недоуплотненного следа короткоживущего метеора. Следовательно, временная последовательность мощности сигнала FM-передатчика при отражении от метеора представляет собой последовательность импульсов, каждый из которых в свою очередь содержит звуковые фонемы. При допущении доминирования последовательности импульсов, спектр аналога АВХ должен быть идентичен спектру мощности сигнала, отраженного от метеора. В свою очередь частота первого локального максимума плотности спектра мощности аналога ABX обратно пропорциональна времени между первой и второй зонами Френеля, что позволяет оценивать скорость метеороидов. По экспериментальным картинам спектра сигнала польской FM-радиостанции в Кельце (частота 88.2 МГц) визуально выделялись максимумы спектральной плотности, и по ним оценивались скорости метеороидов. Необходимо отметить также, что временная последовательность, приведенная на рис. 5, является важным отличительным признаком метеоров и может быть использована для разработки алгоритма их автоматического обнаружения.

- Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. — 416 с.
- Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М.: Сов. радио, 1975. Том II: Теория нелинейной модуляции. 344 с.
- Долуханов М. П. Дальнее распространение ультракоротких волн. — М.: ГИЛ по вопросам связи и радио, 1962. — 177 с.
- Лыков Ю. В., Горелов Д. Ю. Многопозиционная разнесенная радиолокационная станция для исследования метеорного вещества в атмосфере Земли // Восточно-Европейский научно-технический сборник. 2010. № 1. С. 5—15.
- 5. Пат. 2179786 Российской Федерации. Устройство приема частотно-моделируемых сигналов / А. М. Кар-

лов, Е. В. Волхонская, Е. Н. Авдеев. — Опубл. 20.02. 2002. — (http://ru-patent.info/21/75-79/2179786.html).

- Ballinger A. P., Chilson P. B., Palme R. D., Mitchell N. J. On the validity of the ambipolar diffusion assumption in the polar mesopause region // Annales Geophysicae. – 2008. – 26. – P. 3439–3443. – (www.ann-geophys.net/ 26/3439/2008/).
- Charania A. C. Networks on the Edge of Forever: Meteor Burst (MB) Communication Networks on Mars. Version 1.0. Atlanta: SpaceWorks Engineering, Inc. (SEI). 2002. – 51 p. – (http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report /815Charania.pdf).
- Hunt S. M., Oppenheim M., Close S., et al. Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high-gain radar // Icarus. – 2004. – 168, N 1. – P. 34–42.
- Mahmud K., Mukumoto K., Fukuda A. A Meteor Burst Communication System with Dynamic Channel Estimation and Variable Modulation Type. Department of Electrical Engineering, Shizuoka University, 1997. — 8 p. — (http://www2.nict.go.jp/w/w122/old/mt/b193/member/ mahmud/kmahmud/docs/ icspat.pdf).
- Oleynikov A. N., Sosnovchik D. M. Research of Amplitude-Time Characteristic of Television Signal Reflected from a Meteoric Trail in Spased Radar System // Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science: Proc. of the international conference TC-SET 2006. – Lviv, 2006. – P. 291–293.
- Stober G., Jacobi Ch. Meteor head velocity determination. — Wiss. Mitteil. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig March 29, 2007. — 10 p. — (http://www.uni-leipzig.de/ ~jacobi/docs/2007_LIM_5.pdf).
- Wislez Jean-Marc. Forward scattering of radio waves off meteor trails. Urania Public Observatory, Mattheessensstraat 60, B-2540 Hove, Belgium, 1994. – 22 p. – (http:// radiomet.mcse.hu/cikkek/wisje.pdf).

Надійшла до редакції 09.08.10

F. I. Bushuev, N. A. Kalyuzhny, A. P. Slivinsky, A. V. Shulga

THE USE OF FM-SIGNALS OF BROADCASTING STATIONS FOR METEOR QUANTITY INVESTIGATION

Using the signal information of FM-transmitters, we analysed the quantity of observable signals reflected from meteors, depending on their life time. A comparison of the obtained statistics with some earlier known statistics shows their good agreement. This points to the possibility of successful selection of meteors with the use of signals from FM-transmitters. We developed a procedure for the analogue restoration of the amplitude-time characteristic using the spectrum of a signal of a FM-transmitter. The procedure is based on the use of the amplitude modulation of a FM-signal. The amplitude modulation is caused by the Fresnel interference on a meteor trail which results in the disappearance of the signal at the output of a FM-receiver in the case when the signal-to-noise ratio at its input is less than the lower threshold of the frequency demodulator. This assumption was experimentally confirmed by the example of time development of a Polish FM-radio station signal reflected from the underdense trail of a shortliving meteor. The position of the first local maximum of the spectral density of a signal at the FM-receiver output is inversely proportional to the time between the first and second Fresnel zones. This allows one to estimate the velocity of a meteor from the spectrum of a FM-transmitter signal. Using the observations from 10 to 23 June 2010, signals of the Polish FM-radio station were detected through spectral density bursts and spectral density maxima were determined. Besides, velocities of meteors were estimated using the first local maximum positions. The time sequence of the FM-radio station signal reflected from a meteor is an important distinctive feature of the meteor and can be used to develop an algorithm for automatic detection of meteors using a FM-radio station signal.

УДК 520.88

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

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПОСОБА НАКОПЛЕНИЯ КАДРОВ СО СМЕЩЕНИЕМ

Описано метод спостережень низькоорбітальних навколоземних космічних об'єктів з використанням телевізійних ПЗЗкамер без супроводу об'єкта телескопом. Основою метода є спосіб накопичення кадрів зі зсувом, який підвищує відношення сигнал/шум зображень об'єктів, що швидко рухаються в полі зору телескопа. Наведено опис обробки кадрів, програмного забезпечення, технічних засобів, що використовуються, та результатів спостережень.

введение

Оптические координатные наблюдения низкоорбитальных космических объектов (КО) (высота апогея 200-2000 км) является сложной задачей, поскольку КО имеют большую видимую скорость (0.2-2.0 °/с). Наблюдения низкоорбитальных КО, как правило, проводятся в режиме сопровождения объекта телескопом. Использование значительного времени накопления (>0.1 с) налагает жесткие требования к равномерности скорости сопровождения КО, а также приводит к формированию вытянутых изображений опорных звезд. В связи с этим для наблюдения низкоорбитальных КО обычно используются телевизионные камеры (ТВК) с частотой 25 кадров в секунду. Необходимая проницательная способность достигается за счет применения объективов с диаметром $D \ge 30$ см, фокусным расстоянием $F \ge 1$ м [1, 3] и полем зрения менее 0.37°. Такой малый размер поля зрения затрудняет наблюдения объектов с большой ошибкой эфемериды, а также уменьшает количество опорных звезд.

Кроме того, одной из проблем использования ТВК для наблюдения КО является наличие значительной составляющей аддитивного шума в изображении. Накопление кадров повышает отношение сигнал/шум изображения объекта пропорционально корню квадратному из числа складываемых кадров [4]. Однако такой подход применим только к неподвижным изображениям КО в поле зрения телескопа. В НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НАО) был реализован способ суммирования кадров со смещением, позволяющий накапливать изображения объектов, движущихся вдоль расчетного направления по полю ТВК. На базе этого способа был разработан метод координатных наблюдений низкоорбитальных КО на неподвижном телескопе. При использовании этого способа процесс сопровождения и накопления изображения КО происходит на цифровом уровне. Таким образом, нет необходимости в механическом сопровождении и применении больших объективов, что значительно упрощает конструкцию телескопа и процесс наблюдения.

Особенностями разработанного метода являются:

• существенное увеличение проницательной способности за счет применения способа накопления кадров со смещением;

 использование короткофокусных светосильных объективов, обеспечивающих большое поле зрения;

[©] Е. С. КОЗЫРЕВ, Е. С. СИБИРЯКОВА, А. В. ШУЛЬГА, 2011



Рис. 1. Иллюстрация наблюдений на ТВ-камере: a — один ТВ-кадр, δ — накопление последовательности кадров без смещения, s — накопление кадров со смещением

 неподвижность телескопа во время наблюдения, что существенно упрощает процесс наблюдения;

• использование комбинированного метода наблюдений для определения экваториальных координат объекта по опорным звездам.

СПОСОБ НАКОПЛЕНИЯ КАДРОВ СО СМЕЩЕНИЕМ

Способ накопления кадров со смещением (НКС) был реализован в НИИ НАО для повышения проницательной способности ТВК при наблюдении низкоорбитальных КО на неподвижном телескопе. Способ НКС заключается в суммировании последовательности кадров со смещением изображения каждого кадра, соответствующим смещению объекта в поле зрения телескопа. На рис. 1 схематически представлено изображение быстро движущегося наблюдаемого объекта на одном кадре (рис. 1, a); с накоплением последовательности кадров без смещения (рис. 1, δ); и с накоплением последовательности кадров со смещением (рис. 1, e).

Суммирование последовательности кадров производится на момент среднего кадра накапливаемой последовательности T_0 . Величины ΔX_i , ΔY_i смещения изображения вдоль осей X, Y каждого кадра последовательности зависят от разности моментов времени со средним кадром $T_0 - T_i$ и скоростей движения объекта в поле зрения телескопа V_x , V_y :

$$\Delta X_i = (T_0 - T_i)V_X, \quad \Delta Y_i = (T_0 - T_i)V_Y$$

Скорости движения объекта в поле зрения телескопа выражаются в пикселах за секунду и вычисляются следующим образом:

$$V_{X} = \frac{V\cos(\varphi - \beta)}{M_{X}}, V_{Y} = \frac{V\sin(\varphi - \beta)}{M_{Y}},$$

где *V*, град/с — угловая скорость объекта; φ , град — угол направления движения КО к плоскости небесного экватора; β , град — угол наклона оси *X* видимого поля зрения ПЗС-камеры; M_x , M_y , град — угловые размеры пикселя ПЗСкамеры. Угол β для параллактической монтировки постоянен, для азимутальной монтировки зависит от азимута и угла места точки наблюдения.

Угловая скорость КО вычисляется по формуле

$$V = \sqrt{(V_{\tau} \sec \delta)^2 + V_{\delta}^2} ,$$

а угол направления движения КО к плоскости небесного экватора — по формуле

$$\varphi = \arctan\left(\frac{V_{\delta}}{V_{\tau} \sec \delta}\right).$$

Здесь V_{τ} , V_{δ} — мгновенные скорости объекта в первой экваториальной системе координат.

Наблюдения способом НКС проводятся по предварительно рассчитанным эфемеридам и направлены на уточнение элементов орбит наблюдаемого КО. Эфемерида КО задается в виде последовательности положений в первой экваториальной системе координат T_{ρ} , τ_{i} , δ_{i} с шагом от 10 с. Мгновенные скорости объекта V_{τ} , V_{δ} вычисляются из двух последовательных положений:

$$V_{\tau} = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}, \ V_{\delta} = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}.$$

Для наблюдения опорных звезд с использованием способа НКС смещение изображения каждого кадра последовательности рассчитываются так же, как и для КО. Мгновенные скорости опорных звезд в первой экваториальной системе координат составляют $V_{\tau} = 0.004178$ °/c, $V_{\delta} = 0$.

Как уже было сказано выше, преимущество накопления кадров по сравнению с использованием обычного видеоряда с частотой 25 кадров/с заключается в повышении отношения сигнал/ шум. Это приводит к увеличению вероятности обнаружения КО как наблюдателем, так и в автоматическом режиме, а также к повышению точности вычислений прямоугольных коорди-


Puc. **2**. Профили изображений наблюдаемого объекта: a — один TV-кадр (ОСШ = 13.0, fit RMS = 0.09); δ — кадр, полученный в режиме HKC (31 кадр) (ОСШ = 76.7, fit RMS = 0.06)

нат объекта в системе матрицы. Для определения влияния количества складываемых кадров со смещением на качество изображения было проведено сравнение отношения сигнал/шум (ОСШ) и среднего квадратичного отклонения от гауссианы (fit RMS) для изображения низкоорбитального КО, полученного на одном кадре и в режиме накопления кадров со сдвигом. Значения ОСШ и fit RMS определялись программой Astrometrica (http://www.astrometrica.at/) и представлены на рис. 2. Результаты сравнения показали, что сложение 31 кадра повышает ОСШ в 5.9 раз, что соответствует корню квадратному из количества складываемых кадров, и улучшает fit RMS в 1.5 раза.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОД НАБЛЮДЕНИЯ

С целью уточнения элементов орбит КО в НИИ НАО регулярно проводятся наблюдения на неподвижном телескопе с использованием способа НКС для ТВК. Основное преимущество способа НКС заключается в том, что во время наблюдения телескоп остается неподвижным, а сопровождение и накопление изображения объекта происходит на цифровом уровне. Использование способа НКС позволяет отказаться от сложных и дорогостоящих телескопов с системами механического сопровождения. В НИИ НАО для наблюдения низкоорбитальных КО способ НКС применяется с 2007 г.

Эфемериды для низкоорбитальных КО рассчитываются по элементам орбит, представленным на сайте SpaceTrack (http://www.space-track. org/perl/login.pl) в формате TLE с использованием модели движения SGP4. Наблюдения КО проводятся в нескольких точках на видимом участке орбиты. Телескоп наводится в точку встречи КО и остается неподвижным во время наблюдения. В расчетное время производится запись серии кадров, затем телескоп наводится в следующую точку встречи этого же КО. Время записи серии кадров соответствует времени прохождения КО поля зрения телескопа. Эфемерида КО имеет ошибку, которая возрастает с увеличением разницы между эпохой наблюдения и эпохой элементов орбиты. Рост ошибки эфемериды приводит к увеличению видимого угла отклонения движения КО от расчетной линии, а также к увеличению времени запаздывания/опережения. Допустимый угол отклонения определяется размерами поля зрения. Для компенсации ошибки запаздывания/опережения к времени записи добавляется дополнительное время. Дополнительное время наблюдения выбирается в зависимости от разницы эпохи момента наблюдения и эпохи элементов орбиты: ± 5 с для разницы эпох до 2 сут, ± 10 с — до 7 сут, ±60 с — свыше 7 сут. Большое дополнительное время наблюдения (±120 с) используется в случае наблюдений элементов запуска на первых витках после старта ракеты-носителя по начальной неутонченной эфемериде.

Для вычисления экваториальных координат объектов дифференциальным методом применяется комбинированный метод наблюдений



Рис. 3. Распределение относительного количества N низкоорбитальных KO по значениям эффективной поверхности отражения (светлые столбики — список NORAD (1120), темные — список НИИ НАО (277))

(КМН) [2], заключающийся в использовании изображений опорных звезд, полученных отдельно от изображения КО. Изображения КО и опорных звезд формируются в режиме накопления кадров со сдвигом с разными скоростями V_у *V*_{*v*} движения объекта в поле зрения телескопа. Накопление изображений КО и опорных звезд происходит параллельно, каждый кадр видеопотока прибавляется в оба изображения с разными смещениями. Количество складываемых кадров (время экспозиции) для получения изображения КО вычисляется таким образом, чтобы получить необходимое для уверенного отождествления количество изображений КО (5-9). Во время получения серии изображений КО формируются два изображения опорных звезд, необходимые для вычисления экваториальных координат КО с использованием КМН.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ

Для проведения и обработки наблюдений в НИИ НАО применяется программный комплекс, состоящий из двух пакетов программ.

Программный пакет подготовки и проведения наблюдений:

• PlanCU — расчет эфемерид КО по элементам орбиты в TLE-формате; • Control — формирование оптимальной последовательности точек наблюдения КО, минимизация времени наведения и ожидания телескопа. Автоматическое управление процессом наблюдения;

• Motion — наведение телескопа;

• Video — захват и обработка видеопотока в реальном времени. Определение угла β наклона оси *X* видимого поля зрения ПЗС-камеры и угловых размеров пикселя M_x , M_y . Накопление и сохранение серий накопленных изображений КО и опорных звезд.

Программный пакет обработки наблюдений:

• CCD — обработка серии кадров с изображениями объекта: выравнивание фона, детектирование KO; определение прямоугольных координат в системе ПЗС-матрицы;

• Astrometrica — обработка кадров с изображениями опорных звезд: выделение звезд, определение прямоугольных координат в системе ПЗС-матрицы, отождествление с каталогом;

• Satellite — применение модифицированной модели редукции наблюдений для расчета экваториальных координат КО.

Все программное обеспечение, кроме программ PlanCU и Astrometrica, было разработано в НИИ НАО.

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В НИИ НАО наблюдения низкоорбитальных КО с применением способа НКС проводятся на широкоугольном телевизионном канале телескопа Скоростной Автоматический Комплекс, включающем фотографический объектив (D = 47 мм, F = 85 мм) и высокочувствительную телевизионную ПЗС-камеру Watec LCL902H (768×576 , 8.3 мкм). Поле зрения широкоугольного канала составляет $4.3 \times 3.2^\circ$, угловой размер пикселя 20". При наблюдении КО среднее время экспозиции составляет 2 с, что соответствует накоплению 50 кадров. Для наблюдения опорных звезд среднее время экспозиции составляет 15 с, что соответствует накоплению 375 кадров, при этом предельная звездная величина составляет 12^m .

Размер поля зрения позволяет наблюдать объекты с ошибкой эфемериды до 1° по координатам и до 60 с по времени. Скорость переброски телескопа САК составляет 3°/с по обеим осям, время установки в точку 20 с. Средний период наблюдения в одной точке составляет 120 с, что позволяет на одном видимом участке орбиты КО проводить наблюдения в 1—5 точках в зависимости от времени видимости КО. Привязка по времени осуществляется через синхронометр службы времени НИИ НАО с точностью 0.0001 с. Методика наблюдений, техническое и программное оснащение позволяют за ночь наблюдать от 20 до 40 объектов с засечкой в среднем в трех точках встречи по видимой дуге КО.

По результатам 2000 наблюдений низкоорбитальных КО за 2008—2009 гг. определена погрешность вычисления экваториальных координат по отношению к кеплеровой орбите с использованием программного специального программного обеспечения [5]. Погрешность определения координат составила ±1.7–8.1" для объектов 6–11^{*m*}.

Для сравнения: в Украинском национальном центре управления и испытания космических средств на телескопе АЗТ 28 (D = 50 см, F = 8 м), работающем в режиме сопровождения, погрешность наблюдений низкоорбитальных КО составляет $\pm 15-20$ " [3].

Телевизионный канал с применением способа НКС позволяет наблюдать низкоорбитальные

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

КО с массой от 50 кг и эффективной поверхностью отражения (ЭПО) радиоволн от 0.2 м² (45 × × 45 см). На рис. 3 представлено распределение относительного количества объектов по значениям ЭПО для списка низкоорбитальных КО каталога NORAD и списка низкоорбитальных КО, которые наблюдались в НИИ НАО.

выводы

В НИИ НАО реализован способ накопления кадров со смещением, позволяющий значительно повысить проницающую способность (отношение сигнал/шум) телевизионных ПЗС-камер при наблюдении объектов, подвижных в поле зрения телескопа. С использованием способа НКС разработан и внедрен эффективный и простой в использовании метод координатных наблюдений низкоорбитальных КО. Метод применяется для наблюдений на неподвижном телескопе с использованием телевизионных ПЗС-камер и короткофокусных светосильных объективов.

Наблюдения, получаемые в НИИ НАО с использованием способа НКС, используются для уточнения модели движения низкоорбитальных КО, которая разрабатывается совместно с Одесской астрономической обсерваторией. Данные наблюдений используются также для обеспечения функционирования системы контроля и анализа космической обстановки, которая является составной частью Национальной космической программы Украины. С использованием технических и методических разработок НИИ НАО в Украине была создана сеть оптических телескопов для координатных наблюдений низкоорбитальных КО, включающая в себя НИИ НАО, астрономические обсерватории Одесского, Львовского и Ужгородского университетов.

- 1. Драгомирецкий В. В., Бурлак Н. Р., Кошкин Н. И. и др. Система регистрации координат быстродвижущихся небесных тел на основе наблюдательного комплекса на базе теодолита КТ-50 // Околоземная астрономия — 2003: Тр. конф. — Санкт-Петербург, 2003. — С. 253—256.
- 2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом про-

странстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. – М.: ИНАСАН, 2000. – С. 361–371.

- 3. *Рыхальский В. В., Лопаченко В. В, Молотов И. Е.* Результаты наблюдений космических объектов оптическими средствами Украинского национального центра управления и испытания космических средств в 2006 г. // Радиотехнические тетради. 2008. № 36. С. 14—16.
- Стрелков А. И., Барсов В. И., Стрелкова Т. А., Кац Е. Н. Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров // Зб. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. — 2007. — Вип. 1(13). — С. 44—47.
- 5. *Bazyey O. A., Sibiryakova E. S., Shulga A. V.* The method for fast determination of geostationary Earth satellite orbit

from angular coordinates measurements // Odessa Astron. Pubs. – 2005. – 18. – P. 8–14.

Надійшла до редакції 14.10.10

Ye. S. Kozyryev, Ye. S. Sybiryakova, A. V. Shulga

TV OBSERVATIONS OF LOW EARTH ORBIT OBJECTS USING FRAME ACCUMULATION WITH SHIFT

A method for observations of low Earth orbit objects with a TV CCD camera is suggested. The method can be used for telescope observations without object tracking and is based on the frame accumulation with shift. Such frame accumulation allows one to increase the signal/noise ratio for the objects moving fast in the field of view. The frame processing, software, used hardware and observation results are described.

АКТАН Олена Юріївна — науковий співробітник кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — молекулярна фізика.

БУРЛАК Олексій Петрович — аспірант Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

БУШУЄВ Фелікс Іванович — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — розробка електронної та мікропроцесорної апаратури, дослідження сонячно-земних зв'язків та навколоземного простору.

ДЕ ВЕРА Жан-Поль — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства (ФРН), доктор фізики.

Напрям науки — астробіологія, біофізика.

ЗАБАШТА Юрій Федосійович — професор кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — молекулярна фізика.

ЗАЄЦЬ Ірина Євгенівна — науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біотехнологія.

КАЗАНЦЕВ Тарас Анатолійович — науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — фізіологія рослин.

КАЛЮЖНИЙ Микола Панасович — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — розробка програмного забезпечення, дослідження сонячно-земних зв'язків та навколоземного простору.

КАРІМОВА Фаріда Фаритівна — науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Високотемпературні процеси в дисперсних системах» Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова.

Напрям науки — теплофізика.

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

Напрям науки — навколоземна астрономія.

КОЗИРОВСЬКА Наталія Олексіївна — завідувач лабораторії Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — генетика мікроорганізмів.

КОНЧ Александер — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства, ФРН.

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

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

КОЧУБЕЙ Світлана Михайлівна — провідний науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, доктор біологічних наук, професор.

Напрям науки — фізіологія рослин.

ЛОРЕК Андреас — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства (ФРН), доктор фізики.

Напрям науки — фізика.

МІХЄЄВ Олександр Миколайович — завідувач лабораторії Інституту клітинної біології і генетичної інженерії Національної академії наук України, доктор біологічних наук.

Напрям науки — радіаційна біологія.

НОСІКОВ Сергій Вікторович — молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3

ОРЛОВСЬКА Світлана Георгіївна — доцент кафедри теплофізики фізичного факультету Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теплофізика.

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

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

СВЄЧНІКОВА Оксана Сергіївна — старший науковий співробітник кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — молекулярна фізика.

СИБІРЯКОВА Євгенія Сергіївна — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрям науки — навколоземна астрономія.

СЛИВИНСЬКИЙ Олександр Петрович — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія» та Українського радіотехнічного інституту, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіофізика, геофізика, фізика сонячно-земних зв'язків.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери, хвильові процеси в іоносфері.

ФОЇНГ Бернард — провідний науковий співробітник Науково-технологічного центру Європейського космічного агентства (Нідерланди), доктор астрофізики та космічних технологій.

Напрям науки — фізика, космічна техніка.

ЧЕРНЯК Валерій Якович — професор кафедри фізичної електроніки радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізична електроніка.

ШЕЛКОВЄНКОВ Дмитро Олександрович — співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — високоточна мережева ГНСС-навігація і геодезія, попередня обробка ГНСС-спостережень.

ШКОРОПАДО Максим Сергійович — аспірант кафедри теплофізики фізичного факультету Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова.

Напрям науки — теплофізика.

ШУВАЛОВ Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, лауреат премії Національної академії наук України ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — плазмоелектродинаміка космічних апаратів, фізика плазми.

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

Напрям науки — астрометрія, фізика сонячно-земних зв'язків, навколоземний космічний простір.