

НАЦІОНАЛЬНЕ  
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО  
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІСТОРІЯ - АВАНГАРД

ДОСЛІДЖЕННЯ

а ЄАРПІС 1995 р. є 6 Академія наук України

КИЇВ

АРПІС 4, ¶ 2/3, 1998

KYIV

❖ НАЦІОНАЛЬНИЙ АКАДЕМІЙ НАУК УКРАЇНИ — 80 РОКІВ ❖

## ЗМІСТ

Указ Президента України

Величко О. М., Сафронов Ю. І., Клейман О. С., Солов'йов В. С., Ткачук О. О., Яцків Я. С. Державна служба єдиного часу і еталонних частот України: структура і основні засади забезпечення країни високоточною частотно-часовою інформацією

Драновський В. І., Дюнішев В. В., Евдокимов А. П., Ефимов В. Б., Іголкін В. В., Калмиков А. І., Комяк В. А., Крижановський В. В., Курекін А. С., Левантовський В. Ю., Левда А. С., Рыбин В. В., Салтиков Ю. Д., Фетисов А. Б., Цымбал В. Н., Шило С. А., Яцевич С. Е. Комплекс радіофізичної апаратури ІСЗ «Січ-1»

Комяк В. А., Левда А. С., Рыбин В. В., Шило С. А., Яцевич С. Е. Сканируючий СВЧ-радіометр РМ-08 ІСЗ «Січ-1»

## CONTENTS

- 4 Decree of the President of Ukraine  
8 Velychko O. M., Safronov Yu. I., Kleyman O. S., Sолов'йов V. S., Tkachuk A. A., and Yatskiv Ya. S. Ukrainian state service of the united time and standard frequencies: Structure and basic principles for providing the country with high-precision time and frequency information  
12 Dranovskiy V. I., Dyuniashev V. V., Evdokimov A. P., Efimov V. B., Igolkin V. V., Kalmykov A. I., Komyak V. A., Kryzhanovskiy V. V., Kurekin A. S., Levantovskiy V. Yu., Levda A. S., Rybin V. V., Saltykov Yu. D., Fetisov A. B., Tsymbal V. N., Shilo S. A., Yatsevich S. E. Radiophysical instrumentation complex of the «Sich-1» satellite  
21 Komyak V. A., Levda A. S., Rybin V. V., Shilo S. A., Yatsevich S. A. Scanning microwave radiometer RM-08 of the «Sich-1» satellite

<i>Ефимов В. Б., Калмыков И. А., Яцевич С. Е.</i> Особенности наблюдения снежного покрова радиолокационной системой бокового обзора ИСЗ «Січ-1»	27	<i>Efimov V. B., Kalmykov I. A., Yatsevich S. E.</i> Peculiarities of snow cover observations with the side-looking radar of the «Sich-1» satellite
<i>Яцевич С. Е., Курекин А. С., Уваров В. Н., Левда А. С.</i> Автоматическая внутренняя калибровка радиолокационных систем дистанционного зондирования	34	<i>Yatsevich S. E., Kurekin A. S., Uvarov V. N., Levda A. S.</i> Automatic internal calibration of remote sensing systems
<i>Лукин В. В.</i> Цели, методы и алгоритмы локально-адаптивной устойчивой фильтрации радиолокационных изображений	39	<i>Lukin V. V.</i> Goals, methods, and algorithms of locally-adaptive robust filtering of radar images
<i>Фроленко В. М.</i> Оптимальне цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень	51	<i>Frolenko V. M.</i> Optimal digital synthesis of zonal aerospace images
<i>Войнов О. А.</i> Використання дистанційного зондування для оцінки дії стресових факторів на рослинність	58	<i>Voinov O. A.</i> Use of remote sensing methods for evaluating the action of stress factors on vegetation
<i>Галинский В. П., Тимошенко В. И.</i> Проблемы научно-методического обеспечения расчета аэродинамики ракет-носителей	64	<i>Galinskiy V. P., Timoshenko V. I.</i> Problems in developing scientific methods for calculating aerodynamic parameters of boost vehicles
<i>Крючков Е. И.</i> Чувствительность гравиинерциальных датчиков	73	<i>Kryuchkov E. I.</i> Sensitivity of inertial-gravitational instruments
<i>Леонов М. А.</i> Бортовой прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: експеримент Г60С	78	<i>Leonov M. A.</i> Onboard electron accelerator with a capacitance storage: Experiment G60S
<i>Карачун В. В., Петрик А. В.</i> Генератор аэродинамического шума в наземных испытательных комплексах КА	87	<i>Karachun V. V., Petrik A. V.</i> Generator of aerodynamic noise in ground complexes for spacecraft testing
<i>Мостовой С. В., Старostenко В. И., Харитонов О. М.</i> Комплекс наземных сейсмопрогностических наблюдений, методов их обработки и анализа совместно с данными космических наблюдений	93	<i>Mostovoy S., Starostenko V., Kharitonov O.</i> Ground-based observations for predicting seismic events and techniques for their processing and analysis together with the data of ionosphere monitoring from space
<i>Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Телепнев В. Д.</i> Газоструйный имитатор ВУФ- и УМР-излучения Солнца и воздействие его излучения на материалы	102	<i>Verkhovtseva E. T., Yaremenko V. I., and Telepnev V. D.</i> Gas jet simulator of the solar VUV and USX radiation and the effect of its radiation on some materials
<i>Карацуна В. В., Петрик А. В., Гнатейко М. В.</i> Особенности формирования акустического излучения с помощью роторных сирен	110	<i>Karachun V. V., Petrik A. V., Hnatejko M. V.</i> On some peculiarities in the generation of acoustic noise with the help of rotor sirens
<i>Шабохин В. А.</i> Оценка характера взаимодействия свободно-молекулярного потока газа со спутником по экспериментальным данным	113	<i>Shabokhin V. A.</i> Assessing the interaction between free-molecule gas flow and a satellite from experimental data
<i>Макарова А. С., Давыдов С. А., Сорокина Л. А., Давыдова А. В.</i> Моделирование работоспособности средств обеспечения сплошности топлива КА	117	<i>Makarova A. S., Davydov S. A., Sorokina L. A., Davydova A. V.</i> Simulating the efficiency of the means ensuring fuel continuity in space vehicles
<i>Гусынин В. П.</i> Авиационно-космическая система «Пегас». Обзор по материалам открытой зарубежной печати за 1988—1996 гг. II. Характеристики и конструктивные особенности	119	<i>Gusynin V. P.</i> Aerospace system «Pegasus». Review based foreign on materials for 1988—1996. II. Characteristics and construction features
<i>Перерва В. М.</i> Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы	126	<i>Pererva V. M.</i> Space information in the investigation of fluid-conducting lithosphere structures
<i>Лобанов Л. М.</i> Академику Борису Евгеньевичу Патону — 80 лет	133	<i>Lobanov L. M.</i> 80th birthday of Academician Boris Evgenievich Paton
<b>НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ</b>	135	<b>NEWS FROM SPACE AGENCIES</b>
<b>НАШІ АВТОРИ</b>	139	<b>OUR AUTHORS</b>
<b>ПАМ'ЯТКА ДЛЯ АВТОРА</b>	144	

27 листопада 1998 р. виповнюється 80 років  
головному редакторові журналу «Космічна наука і технологія»,  
президентові Національної академії наук України,  
академіку

**Борису Євгеновичу ПАТОНУ**

Редакційна колегія журналу сердечно вітає Бориса Євгеновича з ювілеєм  
і зичить йому міцного здоров'я та наснаги  
для здійснення всіх його творчих задумів.



**УКАЗ**  
**ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ**

**Про заходи щодо підвищення ефективності  
космічної діяльності**

З метою дальнього розвитку однієї з пріоритетних галузей економіки країни — космічної галузі, забезпечення її структурної перебудови, реалізації державної політики у сфері досліджень і використання космічного простору, виробництва і експлуатації космічної техніки **п о с т а н о в л я ю:**

**1. Установити, що Національне космічне агентство України:**

здійснює єдину науково-технологічну політику в галузі створення ракет-носіїв та ракетних комплексів на замовлення Міністерства оборони України;

виконує роботи, пов'язані з використанням ракет-носіїв, створених на базі стратегічних ракетних комплексів, які виводяться з експлуатації у зв'язку з вичерпанням ресурсу або підлягають ліквідації відповідно до міжнародних договорів;

забезпечує конверсію промислових підприємств космічної галузі, пов'язаних з розробленням і виробництвом міжконтинентальних балістичних ракет, їх складових частин та агрегатів, створення на базі конверсійних потужностей високотехнологічного виробництва цивільного призначення новітніх технологій і застосуванням національних та іноземних інвестицій.

**2. Кабінету Міністрів України:**

**1) подати в установленому порядку на розгляд Верховної Ради України:**

у 1998 році — проект Закону України про державну підтримку космічної діяльності;

у 1999 році — проект державної інноваційної програми розвитку космічної галузі (з впровадженням у промисловість космічних технологій та застосуванням спеціального режиму інвестиційного забезпечення виконання цієї програми);

**2) вирішити в четвертому кварталі 1998 року питання про структурну перебудову космічної галузі та розробити план заходів, передбачивши, зокрема:**

затвердження Положення про представництва генерального замовника — Національного космічного агентства України на підприємствах космічної галузі;

утворення відповідно до законодавства на базі виробничого об'єднання «Південний машинобудівний завод» та Державного конструкторського бюро «Південне державної ракетно-космічної корпорації «Південний машинобудівний завод»;

реструктуризацію та корпоратизацію в разі потреби підприємств космічної галузі, утримувати які в наявному стані для економіки країни є недоцільним;

передачу до 1 квітня 1999 року в установленому порядку до сфери управління Національного космічного агентства України державних підприємств, що становлять основу космічної галузі країни, та акцій (пайв, часток), які перебувають у державній власності, та господарських товариств, у тому числі тих, що утворені за участю іноземних суб'єктів господарської діяльності;

сприяння залученню підприємствами космічної галузі кредитів міжнародних та іноземних інвестицій, грантів і міжнародної технічної допомоги для реформування цієї галузі та забезпечення реалізації міжнародних космічних проектів за участю зазначених підприємств;

приведення структури та чисельності центрального апарату Національного космічного агентства України у відповідність з функціями, які ним здійснюються.

**3. Національному космічному агентству України:**

утворити протягом 1999 року на підприємствах космічної галузі представництва генерального замовника — Національного космічного агентства України;

подати в установленому порядку в четвертому кварталі 1998 року пропозиції щодо внесення до Положення про Національне космічне агентство України змін і доповнень, які випливають з цього Указу.

Президент України

Л. КУЧМА

м. Київ  
27 жовтня 1998 року  
№ 1190/98



**УКАЗ**  
**ПРЕЗИДЕНТА**                    **УКРАЇНИ**

**Про державну підтримку космічної діяльності**

З метою виконання Загальнодержавної (Національної) космічної програми України на 1998-2002 роки і реалізації державної політики у сфері космічної діяльності та відповідно до пункту 4 розділу XV «Перехідні положення» Конституції України постановлюю:

**1. Визначити метою державної підтримки космічної діяльності в Україні:**

збереження і подальший розвиток науково-технічного, технологічного та виробничого потенціалу космічної галузі та конкурентоспроможності розробок (виробів) вітчизняних суб'єктів космічної діяльності;

збереження і подальший розвиток унікальних об'єктів космічної діяльності;

створення економічних умов та надання гарантій для залучення інвестицій (у тому числі іноземних) у розвиток космічної галузі.

**2. Установити, що тимчасово, до 1 січня 2009 року, ввізне мито не справляється при ввезенні на митну територію України товарів для виробництва космічної техніки (включаючи агрегати, системи та їх комплектуючі для космічних комплексів, космічних носіїв, космічних апаратів і наземних сегментів космічних систем), якщо такі товари не виготовляються на території України. Перелік цих товарів з визначенням кодів згідно з Гармонізованою системою опису та кодування товарів, а також порядок і обсяги їх ввезення встановлюються Кабінетом Міністрів України.**

У разі порушення цільового використання зазначених товарів платник податку зобов'язаний збільшити податкові зобов'язання за наслідками податкового періоду, на який припадає таке порушення, на суму податку на додану вартість, що мала бути сплачена в момент ввезення на митну територію України таких товарів, а також сплатити пеню, нараховану на таку суму податку, виходячи з 120 відсотків облікової ставки Національного банку України, що діяла на день збільшення податкового зобов'язання, та за період від дати ввезення таких товарів до дати збільшення податкових зобов'язань.

**3. Установити, що тимчасово, до 1 січня 2009 року, звільняються від обкладення податком на додану вартість операції з продажу космічних комплексів, космічних ракет-носіїв, космічних апаратів, наземних сегментів космічних систем та їх агрегатів, систем і комплектуючих, що вироблені суб'єктами космічної діяльності за рахунок коштів Державного бюджету України,**

**4. Установити, що тимчасово, до 1 січня 2009 року, звільняються від обкладення податком на додану вартість операції з ввезення суб'єктами космічної діяльності на митну територію України товарів для виробництва космічної техніки (включаючи агрегати, системи та їх комплектуючі для космічних комплексів, космічних ракет-носіїв, космічних апаратів та наземних сегментів космічних систем), якщо такі товари не виготовляються на території України і придбаються за рахунок коштів Державного**

бюджету України, крім підакцизних товарів. Порядок і обсяги ввезення зазначених товарів, а також перелік таких товарів з визначенням їх кодів згідно з Гармонізованою системою опису та кодування товарів та перелік підприємств (організацій), які ввозять ці товари, встановлюються Кабінетом Міністрів України.

У разі порушення цільового використання зазначених товарів платник податку зобов'язаний збільшити податкові зобов'язання за наслідками податкового періоду, на який припадає таке порушення, на суму податку на додану вартість, що мала бути сплачена в момент ввезення на митну територію України таких товарів, а також сплатити пеню, нараховану на таку суму податку, виходячи з 120 відсотків облікової ставки Національного банку України, що діяла на день збільшення податкового зобов'язання, та за період від дати ввезення таких товарів до дати збільшення податкових зобов'язань.

5. Установити, що тимчасово, до 1 січня 2009 року, звільняються від сплати земельного податку суб'єкти космічної діяльності згідно з переліком, який щорічно затверджується Кабінетом Міністрів України.

6. Установити тимчасово, до 1 січня 2009 року, для суб'єктів космічної діяльності щорічну 20-відсоткову норму прискореної амортизації основних фондів групи 3. При цьому амортизація основних фондів групи 3 провадиться до досягнення балансовою вартістю групи нульового значення.

7. Починаючи з 1 січня 1999 року і до 1 січня 2009 року для суб'єктів космічної діяльності України податковим періодом оподаткування їх прибутку встановлюється звітний податковий рік.

8. Установити, що розрахунки за експортно-імпортними операціями після перерахування авансу суб'єктами космічної діяльності за виконання робіт з виготовлення (розробки) агрегатів, систем та їх комплектуючих для космічних комплексів, космічних ракет-носіїв, космічних апаратів і наземних сегментів космічних систем здійснюються у строк до 500 календарних днів.

9. Визначити Національне космічне агентство України органом, який веде Державний реєстр унікальних об'єктів космічної діяльності, здійснює державний нагляд за їх станом, вживає заходи для їх підтримки та здійснює фінансування діяльності цих об'єктів у встановленому порядку.

10. Кабінету Міністрів України: розробити та затвердити до 15 грудня 1998 року нормативно-правові акти, передбачені статтями 2, 4, 5 цього Указу; розробити заходи щодо забезпечення функціонування, збереження та подальшого розвитку унікальних об'єктів космічної діяльності.

11. Національному космічному агентству України до 15 грудня 1998 року подати пропозиції щодо внесення змін і доповнень до Положення про Національне космічне агентство України, що випливають з цього Указу.

12. Цей Указ набирає чинності в порядку, передбаченому пунктом 4 розділу XV «Перехідні положення» Конституції України.

Президент України

Л. КУЧМА

м. Київ  
27 жовтня 1998 року  
№ 1191/98

УДК 529: 781

Державна служба  
єдиного часу і еталонних частот України:  
структурі і основні засади забезпечення країни  
високоточною частотно-часовою інформацією

О. М. Величко<sup>1</sup>, Ю. І. Сафронов<sup>1</sup>, О. С. Клейман<sup>2</sup>,  
В. С. Соловйов<sup>2</sup>, О. О. Ткачук<sup>2</sup>, Я. С. Яцків<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Держстандарт, Київ

<sup>2</sup>ДНВО «Метрологія», Харків

<sup>3</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 23.04.98*

Розглядаються організаційна структура і основні завдання Державної служби єдиного часу і еталонних частот України. Описується її сучасний стан, роль основних підрозділів у забезпеченні частотно-часовою інформацією різних галузей економіки України, в т. ч. космічної.

З урахуванням сутності часу як філософської категорії еталони одиниць часу і частоти повинні діяти безперервно. За допомогою цих еталонів відтворюються шкала і одиниця часу, які є основою забезпечення єдності усіх вимірювань часу в країні (ст. 8 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»). Безперервний режим роботи цих еталонів та інших засобів вимірювання часу відображене в назві «служба» — вся сукупність робіт, пов’язаних з відтворенням, зберіганням одиниць часу і частоти, шкали часу та розповсюдженням частотно-часової інформації. Цією назвою підкреслюється можливість кожного споживача будь-коли одержати інформацію про поточний час з необхідною точністю. Забезпечення цієї можливості є основною метою служб часу країн світу, зокрема Державної служби єдиного часу і еталонних частот (ДСЧЧ) України [1, 2].

Основними завданнями ДСЧЧ є:

- відтворення та зберігання національної шкали часу UTC(UA) та порівняння її з шкалою Всесвітнього координованого часу UTC;

- передавання еталонних сигналів часу та частоти (ЕСЧЧ) по телебаченню, радіо, мережі проводового мовлення, супутниковими, радіометеорним (РМК) та іншими каналами зв’язку, а також забезпечення споживачів необхідною інформацією довідкового характеру;
- здійснення контролю правильності передавання ЕСЧЧ, забезпечення відповідності їхніх характеристик встановленим нормам та доведення цієї інформації до споживачів ЕСЧЧ;
- визначення всесвітнього часу та параметрів орієнтації Землі і забезпечення споживачів відповідною інформацією;
- аналіз метрологічного забезпечення вимірювань часу і частоти та постійне його удосконалення;
- розробка та впровадження нормативних документів в галузі вимірювань часу і частоти;
- проведення науково-дослідних та дослідно-кон-

- структурських робіт з метою підвищення точності відтворення і зберігання одиниць часу і частоти та шкал часу, передавання ЕСЧЧ, створення нових засобів вимірюальної техніки та ін.;
- науково-методичне керівництво службами часу підприємств та організацій;
  - здійснення міжнародного співробітництва в галузі вимірювань часу і частоти тощо.

Вирішення завдань, що витікають з поставленої мети, можливе за умов створення певної організаційної структури ДСЧЧ, її технічної бази, визначення прав та обов'язків підрозділів ДСЧЧ, регламенту взаємозв'язків між ними. Слід мати на увазі, що ДСЧЧ несе не тільки інформаційне навантаження, але також повинна брати участь у виконанні ще однієї важливої функції — забезпечення єдності вимірювань часу і частоти в державі (частина 6 ст. 12 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»). Для цього необхідно, щоб в її структурі були передбачені відповідні технічні засоби та підрозділи, які б виконували цю роботу.

Одне із специфічних завдань ДСЧЧ в Україні витікає з того, що споживачі мають можливість користуватися не тільки інформацією про точний час і еталонні частоти, яка передається технічними засобами ДСЧЧ України, а й ЕСЧЧ, що передаються радіостанціями інших держав, а також радіонавігаційними системами космічного базування, що належать Росії (ГЛОНАСС) та США (НАВСТАР). Для їх контролю та порівняння з національною шкалою часу України в структурі ДСЧЧ повинні бути засоби контролю та керування, а також відповідні організаційні структури, котрі б інформували споживача про параметри частотно-часової інформації, яку він отримує як з вітчизняних, так і з іноземних джерел.

При розробці структури ДСЧЧ враховано, що для вирішення багатьох наукових і прикладних завдань необхідно знати параметри орієнтації Землі та шкалу всесвітнього часу. Цим обумовлене створення у складі ДСЧЧ Українського центру визначення параметрів орієнтації Землі (УЦ ПОЗ), основними завданнями якого є збирання та аналіз відповідної інформації та забезпечення нею споживачів. УЦ ПОЗ здійснює співробітництво з Міжнародною службою обертання Землі (IERS), виступаючи в ролі центру аналізу лазерно-локацийних і радіоінтерферометричних спостережень.

Виконання Державної програми «Створення і розвиток Державної служби єдиного часу і еталонних частот у 1995—1997 рр.» дозволило розробити структуру ДСЧЧ з урахуванням організаційних

заходів для забезпечення єдності вимірювань часу і частоти.

При розробці структури було враховано, що головним координуючим органом в галузі забезпечення споживачів частотно-часовою інформацією є Державна комісія єдиного часу і еталонних частот України, в положенні про яку концептуально визначено основні завдання ДСЧЧ, а державним замовником і органом управління програмою є Держстандарт України (робочим органом ДСЧЧ визнано відповідний підрозділ Держстандарту).

Максимально враховані також наявні технічні та кадрові можливості організацій, що входять до складу ДСЧЧ. В Україні є дві організації, підрозділи яких багато років брали участь в роботі ДСЧЧ СРСР (Державне науково-виробниче об'єднання «Метрологія», м. Харків та філія Державного науково-дослідного інституту «Система», м. Ужгород) [3]. Наприкінці 1996 р. міжвідомчою комісією прийнято, а наказом Держстандарту України від 18 квітня 1997 р. № 220 затверджено державний первинний еталон одиниць часу і частоти, який створений у ДНВО «Метрологія» [4] і є основою еталонної бази ДСЧЧ. Додатково в роботі ДСЧЧ України задіяний підрозділ Українського центру стандартизації, метрології та сертифікації (УкрЦСМ), м. Київ, який має робочий еталон часу і частоти. Наявні підрозділи досить вдало розташовані по території України (захід, центр, схід) з точки зору виконання функцій забезпечення єдності вимірювань часу і частоти.

При вирішенні питання про методи передачі частотно-часової інформації враховано той факт, що власних спеціалізованих радіостанцій, а також космічних радіонавігаційних систем Україна не має і в найближчий час не буде мати. Найбільш розглаголеною в Україні є система телебачення, що і робить її найпридатнішою власною базою для розповсюдження частотно-часової інформації. Система передачі ЕСЧЧ по Українському державному телебаченню (канали УТ-1 і УТ-2) задовольнить потреби більшості споживачів у частотно-часовій інформації. Для окремих споживачів, кому потрібно порівнювати або синхронізувати місцеві шкали часу зі шкалою часу державного первинного еталона з найвищою точністю (похибка менше 0.1 мкс), пропонується використання спеціалізованої апаратури зв'язку по радіометеорних каналах.

Після розробки, узгодження із зацікавленими організаціями і установами рішенням Державної комісії єдиного часу і еталонних частот в кінці 1996 р. затверджено організаційну структуру ДСЧЧ (рисунок) та Положення про ДСЧЧ України. З набуттям чинності Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»



Організаційна структура Державної служби єдиного часу і еталонних частот України

(13.03.98 р.) зазначене Положення затверджується відповідно до статті 12 цього закону постановою Кабінету Міністрів України.

В Положенні визначено, що Державна служба єдиного часу та еталонних частот України — це система підрозділів міністерств і відомств, об'єднаних постійною науково-метрологічною діяльністю щодо вимірювань часу і частоти в єдиних на території України одиницях і шкалах та забезпечення споживачів частотно-часовою інформацією. В Положенні поданий перелік міністерств та відомств, що беруть участь у ДСЧЧ, та вказано, які функції вони повинні виконувати. Зокрема Держстандарт України забезпечує функціонування і розвиток ДСЧЧ, взаємодію й підрозділів, Держкомзв'язку спільно з Держтелерадіо забезпечують передавання ЕСЧЧ різними каналами, в тому числі упровадження ЕСЧЧ в програми Українського телебачення і радіомовлення, Національне космічне агентство України відповідає за організацію використання супутниковых каналів зв'язку для метрологічного забезпечення частотно-часових вимірювань. Національна академія наук України здійснює керівництво Українською службою визначення параметрів орієнтації Землі і разом з Міннауками, Міносвіти, Укргеодезкартографією бере участь у виконанні фундаментальних наукових досліджень з

метою підвищення точності вимірювань часу і частоти на основі використання нових фізичних принципів та технологій. Мінпромполітики організовує розробку та виробництво засобів вимірювальної техніки, необхідних для забезпечення функціонування ДСЧЧ та її розвитку, а також приймально-вимірювальної апаратури для широкого кола споживачів, Міноборони України бере участь в роботах з контролю та керування ЕСЧЧ, в наукових дослідженнях та розробках в галузі частотно-часового забезпечення споживачів Міноборони.

Координацію науково-метрологічних робіт організацій, які входять до ДСЧЧ, а також оперативне керівництво ними в частині, що стосується ДСЧЧ, здійснює Український метрологічний центр (УМЦ) ДСЧЧ, створений на базі ДНВО «Метрологія», м. Харків.

Основні роботи в галузі вимірювань часу і частоти в закріплених регіонах здійснюють метрологічні центри (МЦ) ДСЧЧ: Північний, створений на базі УкрЦСМ, м. Київ; Західний, створений на базі Закарпатського відділення ДНДІ «Система», м. Ужгород, а також Центр метрологічного контролю (ЦМК), який створено на базі Наукового метрологічного центру (військових еталонів), м. Харків. УМЦ, МЦ і ЦМК здійснюють оперативний контроль радіотелевізійних передавальних центрів

(РТПЦ), які передають ЕСЧЧ. Метрологічний контроль ЕСЧЧ в окремих районах здійснюють також пункти метрологічного контролю (ПМК). Регіональні метрологічні центри ДСЧЧ підконтрольні УМЦ ДСЧЧ в межах його повноважень.

Координацію робіт з визначення всесвітнього часу та параметрів орієнтації Землі (ПОЗ) здійснює, як вказано вище, УЦ ПОЗ, який створено на базі Головної астрономічної обсерваторії (ГАО) НАНУ, м. Київ. УЦ ПОЗ здійснює керівництво із зазначених питань астрономічними обсерваторіями (АО), станціями лазерних спостережень (СЛС) штучних супутників Землі, пунктами прийому сигналів космічних навігаційних систем (КНС), пунктами радіointерферометрів з наддовгими базами (РНДБ), які здійснюють спостереження за міжнародними програмами з метою визначення ПОЗ.

Основні завдання і функції, організаційна структура та технічний склад УМЦ ДСЧЧ, регіональних МЦ ДСЧЧ, ЦМК і ПМК МО, а також УЦ ПОЗ визначаються окремими положеннями.

В статті 37 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» визначено, що фінансування робіт, які необхідні для забезпечення функціонування і розвитку ДСЧЧ, здійснюється за рахунок державного бюджету. Кошти виділяються щорічно під час формування Державного бюджету та Програми соціального розвитку України цільовим призначенням Держстандарту України, котрий здійснює їхній розподіл за узгодженням з Державною комісією єдиного часу і еталонних частот.

Всі структурні підрозділи ДСЧЧ підлягають атестації, яка проводиться з метою:

- визначення рівня матеріально-технічної бази підрозділів ДСЧЧ;
- встановлення компетенції їх кадрового складу, а також умов праці персоналу;
- оцінювання відповідності умов зберігання, експлуатації та використання технічних засобів відповідно вимогам.

Встановлено два різновиди атестації: первинна і періодична. Первинній атестації підлягають відповідні підрозділи ДСЧЧ на час створення або їхньої реорганізації, а періодична атестація проводиться не рідше одного разу на п'ять років для підтвердження спроможності організації виконувати покладені на неї функції. Атестація проводиться міжвідомчою комісією і за її результатами складається акт встановленої форми, на підставі якого видається свідоцтво на право виконання відповідних робіт.

Основні структурні підрозділи, що входять до складу ДСЧЧ, створені і наприкінці 1997 р. пройшли атестацію згідно з затвердженими програмами

як Український, Північний та Західний метрологічні центри ДСЧЧ.

Атестація УМЦ ДСЧЧ і МЦ ДСЧЧ здійснена на право проведення робіт, які встановлені положеннями про ці центри, а саме:

- забезпечення функціонування первинного чи робочих еталонів;
- відтворення та зберігання шкал атомного та координованого часу;
- управління передачею ЕСЧЧ технічними засобами України;
- контроль ЕСЧЧ, що передаються різними каналами зв'язку.

Планується також атестація УЦ ПОЗ, створеного на базі ГАО НАНУ, а також ЦМК і ПК МО України.

Таким чином, запропонована структура ДСЧЧ є найбільш оптимізованою з точки зору виконання кола завдань ДСЧЧ і максимального використання наявних технічних та кадрових ресурсів організацій, що входять до складу ДСЧЧ, а чітка робота її підрозділів і технічних систем є вагомою основою для успішного виконання фундаментальних наукових досліджень, реалізації національних космічних програм, забезпечення різних галузей економіки України, її національної безпеки необхідною частотно-часовою інформацією на сучасному рівні.

1. Величко О. М., Макаренко Б. І., Камінський В. Ю. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот — необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Косміч. наука і технологія.—1997.—3, № 1/2.—С. 7—15.

2. Величко О. М., Миронов М. Т., Сидоренко Г. С. та ін. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот // Укр. метрологічний журн.—1996.—Вип. 4.—С. 13—16.

3. Клейман А. С., Солов'єв В. С., Ткачук А. А. Эталонная база Украины в области измерений времени и частоты // Укр. метрологічний журн.—1996.—Вип. 4.—С. 17—18.

4. Клейман О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти // Укр. метрологічний журн.—1997.—Вип. 3.—С. 18—23.

#### UKRAINIAN STATE SERVICE OF THE UNITED TIME AND STANDARD FREQUENCIES: STRUCTURE AND BASIC PRINCIPLES FOR PROVIDING THE COUNTRY WITH HIGH-PRECISION TIME AND FREQUENCY INFORMATION

O. M. Velychko, Yu. I. Safronov, O. S. Kleyman,  
V. S. Solovyov, A. A. Tkachuk, and Ya. S. Yatskiv

The organization structure and main problems of the Ukrainian state service of the united time and standard frequencies are considered. Its present state and the role of its basic divisions in providing various fields of the Ukrainian economics, including the space science and its applications, with the time and frequency information are presented.

УДК 551.501.81

## Комплекс ІСЗ      радиофизической «Січ-1»      аппаратуры

В. И. Драновский<sup>2</sup>, В. В. Дюняшев<sup>3</sup>, А. П. Евдокимов<sup>1</sup>, В. Б. Ефимов<sup>4</sup>,  
В. В. Иголкин<sup>4</sup>, А. И. Калмыков<sup>1</sup>, В. А. Комяк<sup>1</sup>, В. В. Крыжановский<sup>1</sup>,  
А. С. Курекин<sup>4</sup>, В. Ю. Левантовский<sup>4</sup>, А. С. Левда<sup>4</sup>, В. В. Рыбин<sup>3</sup>,  
Ю. Д. Салтыков<sup>2</sup>, А. Б. Фетисов<sup>4</sup>, В. Н. Цымбал<sup>4</sup>, С. А. Шило<sup>1</sup>, С. Е. Яцевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики і електроніки НАН України, Харків

<sup>2</sup>ДКБ «Південне», Дніпропетровськ

<sup>3</sup>Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

<sup>4</sup>Центр радіофізичного зондування Землі НАН України і НКА України, Харків

*Надійшла до редакції 11.03.98*

На основі аналізу переваг комплексного використування інформації активних та пасивних радіолокаційних засобів обґрунтуються параметри і склад радіофізичної апаратури дистанційного зондування системи Земля—атмосфера космічного базування, приводяться приклади спостережень природного середовища, аналіз отриманих результатів.

Успешное решение океанографических задач с помощью комплексов дистанционного зондирования во многом определяется оптимальным выбором параметров приборов, составляющих комплекс. Перспективным представляется совместное использование таких датчиков, в основе которых лежат различные физические процессы (например, активных и пассивных радиолокационных средств) [1]. К числу основных параметров, требующих оптимизации, можно отнести пространственное разрешение, чувствительность, длину волны и поляризацию излучения, углы визирования и т. д.

В работе приведено обоснование выбора параметров комплекса радиофизической аппаратуры океанографических ИСЗ типа «Січ-1» и его описание. Комплекс состоит из радиолокатора бокового обзора (РБО) и сканирующего радиометра (СКРМ) и предназначен для исследования морской поверхности и ледяных покровов.

© В. И. ДРАНОВСКИЙ, В. В. ДЮНЯШЕВ, А. П. ЕВДОКИМОВ,  
В. Б. ЕФИМОВ, В. В. ИГОЛКИН, А. И. КАЛМЫКОВ, В. А. КОМЯК,  
В. В. КРЫЖАНОВСКИЙ, А. С. КУРЕКИН, В. Ю. ЛЕВАНТОВСКИЙ,  
А. С. ЛЕВДА, В. В. РЫБИН, Ю. Д. САЛТЫКОВ, А. Б. ФЕТИСОВ,  
В. Н. ЦЫМБАЛ, С. А. ШИЛО, С. Е. ЯЦЕВИЧ, 1998

При зондировании океана большую ценность представляет получение оперативных данных о поле скоростей приводного ветра. В работе [10] показано, что РБО эта задача оптимально решается в диапазоне длин волн  $\lambda = 3\div 5$  см при вертикальной поляризации излучения. На рис. 1 представлена зависимость средней информативности радиолокационных сигналов от рабочей длины волны при различении участков волнения, соответствующих разным скоростям ветра, а также обнаружении неоднородностей.

Чувствительность радиометрического датчика к ветровым процессам определяется в первую очередь излучением пенных образований. Область слабой чувствительности к вариациям скорости ветра соответствует отсутствию пены и лежит в диапазоне 0—6 м/с. Максимум чувствительности в диапазоне скоростей ветра 7—20 м/с приходится на  $\lambda = 0.8$  см при горизонтальной поляризации излучения [13],

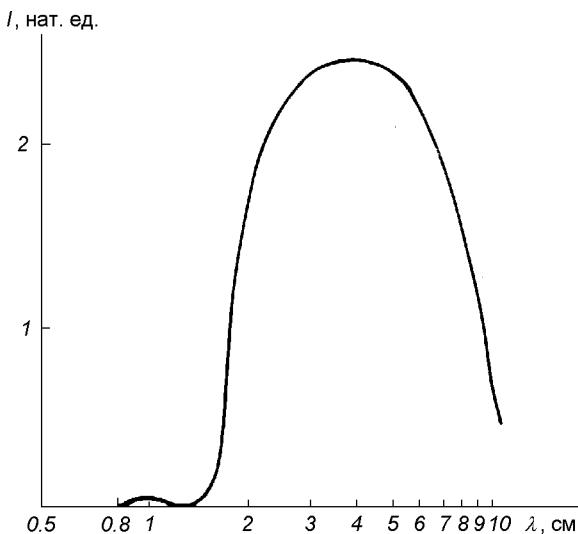


Рис. 1. Частотная зависимость информативности РЛС БО при определении состояния поверхности океана

что определяется спектральным максимумом зависимости

$$B_w(\lambda) \propto [e_n(\lambda) - e_b(\lambda)],$$

где  $e_n$ ,  $e_b$  — коэффициенты излучения пены и воды соответственно [7]. При этом минимальна ошибка, обусловленная вариациями физической температуры воды и ее солености [15]. Зависимость  $B_w(\lambda)$  представлена на рис. 2 сплошной линией.

Выбором этих длин волн для РБО и СКРМ обеспечивается максимальная их чувствительность к вариациям скорости ветра (при малых его скоростях — для РБО, при больших — СКРМ).

Основной задачей зондирования ледяных покровов является определение их толщины. Анализ экспериментальных данных [23] показывает, что максимальные радиолокационные контрасты между различными возрастными градациями льда соответствуют  $\lambda \approx 3$  см и составляют величину более 10 дБ, в то время как для дециметрового диапазона контрасты практически отсутствуют (рис. 3). Так же отмечается отсутствие зависимости уровня отраженного сигнала от поляризации излучения.

Максимальные радиотепловые контрасты между молодыми и многолетними льдами наблюдаются в мм-диапазоне радиоволн и увеличиваются с уменьшением длины волны. Однако в коротковолновой части мм-диапазона практически отсутствуют контрасты между многолетним льдом и водой, причем в зависимости от характеристик снежного по-

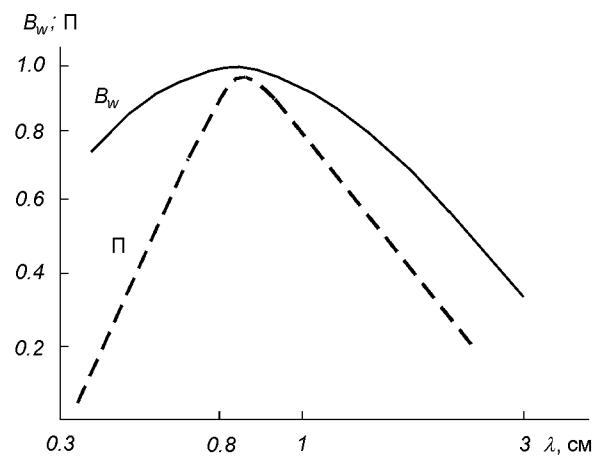


Рис. 2. Спектральная зависимость чувствительности радиометра к скорости приводного ветра и возрасту ледяного покрова

кровя на льду эти контрасты могут становиться даже отрицательными [16]. При анализе информативности выбирался критерий вида

$$\Pi = K_{\text{сл}-\text{в}} \cdot K_{\text{мл}-\text{в}} \cdot K_{\text{сл}-\text{мл}},$$

где  $K$  — контрасты радиояркостных температур между старым льдом и водой, молодым льдом и водой и между однолетними и многолетними льдами соответственно. Зависимость  $\Pi$  от длины волны показана на рис. 2 пунктирной линией. Очевидно, что и для ледовых задач максимум спектральной чувствительности радиометрического датчика приходится на  $\lambda \approx 0.8$  см. При этом обнаружение границы вода—лед следует производить на горизонтальной поляризации излучения. Для синхронного зондирования поверхности комплексом радиофизической аппаратуры оптимальными являются углы наблюдения  $20^\circ$ — $60^\circ$  от надира. В этом диапазоне углов обеспечивается максимальная чувствительность РБО к неоднородностям волнения и минимальное влияние изменения шероховатости поверхности моря на ее радиояркостную температуру, что уменьшает ошибки определения скорости приводного ветра на основе данных СКРМ, при определении скорости ветра по степени покрытия поверхности пеной.

Результаты проведенного анализа послужили основой для выбора основных параметров комплекса радиофизической аппаратуры, включающего РБО и СКРМ, установленного на борту ИСЗ «Січ-1».

На основе выработанных рекомендаций в ИРЭ НАН Украины были разработаны эксперименталь-

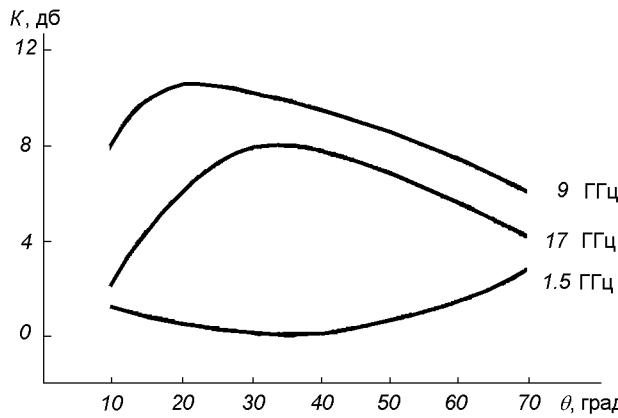


Рис. 3. Зависимость радиолокационных контрастов многогодичного—однолетний лед от угла наблюдения и длины волн

ные образцы комплексов радиофизической аппаратуры, реализующей предложенный способ зондирования [1], и в экспериментах с ИСЗ проведены испытания разработанного метода и аппаратуры [21]. Океанографический ИСЗ «Січ-1» оснащен системой метеорологического зондирования [2], изготовленной в АО НИИРИ (г. Харьков). Она включает в себя комплекс радиофизической аппаратуры [21, 22], состоящий из радиолокатора бокового обзора (РЛС БО), аналогичного установленному на борту ИСЗ «Космос-1500» [9, 11, 12], сканирующего радиометра миллиметрового диапазона (РМ-08) [5, 8] и блока обработки сигналов (БОС), созданного на основе алгоритма [20]. Кроме того, в состав системы входит также радиотелевизионный комплекс (РТВК) [18], состоящий из четырехканального оптикомеханического сканирующего устройства малого разрешения (МСУ-М) [17], хронизатора, запоминающего устройства, радиолиний метрового и дециметрового диапазонов. Блок-схема системы приведена на рис. 4.

Для обеспечения высокой оперативности доставки информации непосредственно потребителям, на борту ИСЗ организована ее обработка в реальном времени, а для передачи используются стандартные линии РТВК, которые широко применяются для трансляции оптической информации спутников серии «Метеор». Это позволило обеспечить доступ потребителей, традиционно использующих космические оптические изображения, к радиофизическим данным через разветвленную сеть автономных приемных пунктов.

Представление радиофизической информации в виде радиолокационного и радиотеплового изобра-

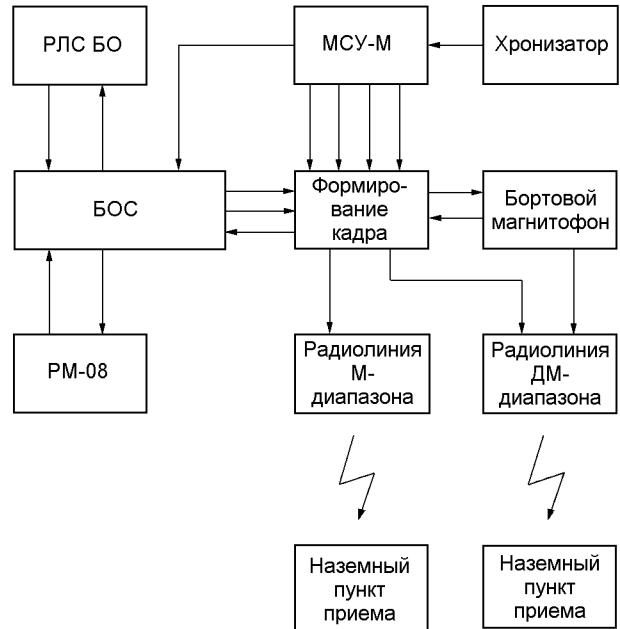


Рис. 4. Блок-схема системы метеорологического зондирования ИСЗ «Січ-1»

жений подстилающей поверхности строчнокадровой структуры аналогично оптическим изображениям, полученным МСУ-М. Формирование этих трех изображений на одном бланке [2] (рис. 5) существенно облегчило потребителю работу с радиофизической информацией за счет опыта дешифрирования оптических изображений. Оснащение системы РФА бортовым запоминающим устройством позволило обеспечить получение и сброс информации над любым районом земного шара.

Рассмотрим более подробно схему построения комплекса радиофизической аппаратуры. Следует отметить, что для решения большинства океанографических задач требуемое пространственное разрешение составляет 1 км, что для бортовой РЛС БО 3-см диапазона реализуемо при ширине диаграммы направленности антенны  $\approx 0.2^\circ$  (линейный размер антенны  $\approx 11$  м). Раскрываемая волноводно-щелевая антенна длиной 11 м [19] подключается к РЛС БО через антенный коммутатор, обеспечивающий развязку между передатчиком и приемником. Приемник РЛС БО выполнен по супергетеродинной схеме с малошумящим усилителем СВЧ-диапазона на входе. Автоматическая подстройка частоты гетеродина позволяет использовать достаточно узкополосный приемник с оптимизированным соотноше-

Рис. 5. Радиотепловое (а), радиолокационное (б) и оптическое (в) изображения в едином формате в «совмещенном» режиме работы

нием сигнал/шум на выходе. Передатчик РЛС БО выполнен на импульсном магнетроне. В РЛС БО предусмотрена сквозная калибровка потенциала [4], для чего используется ослабленный и задержанный во времени СВЧ-импульс передатчика, который через управляемый аттенюатор и направленный ответвитель подается на вход приемника. Калибровочный сигнал, пройдя все цепи приемника, блока обработки сигнала и линии передачи, фиксируется на выходном бланке в виде периодически повторяющегося восьмиградационного яркостного клина, примыкающего к радиолокационному изображению. По изменению яркости градаций калибровочного клина можно контролировать изменение характеристик радиолокатора и учитывать их при обработке информации [11]. Наличие калибровочного клина позволяет получать абсолютные значения удельной эффективной площади рассеяния исследуемой поверхности [12].

Сканирующий радиометр [3] выполнен по модуляционной схеме и представляет собой супергетеродинный приемник с модулятором на входе. Радиометр состоит из сканирующей антенны [8], модулятора, приемника, генератора опорного напряжения, синхронного детектора, интегратора, блока калибровки, блока управления сканированием, усилителей постоянного тока и коммутатора.

Антенная система СКРМ представляет собой фрагмент параболического цилиндра, на фокальной оси которого расположен сканирующий облучатель, выполненный на основе диэлектрического волновода, в электродинамическом взаимодействии с которым находится набор рассеивателей, размещенных на цилиндрическом барабане вдоль его образующих [6]. Размер апертуры антенной системы  $1150 \times 580 \text{ мм}^2$ . Управление диаграммой направленности при сканировании осуществляется с помощью шагового двигателя [5], который вращением барабана последовательно подключает к диэлектрическому волноводу облучателя соответствующие рассеиватели. Используемая антенная система за счет соответствующего выбора параметров рассеивателей позволяет осуществлять сканирование по строчно-линейному закону без потерь времени на обратный ход луча. Высокая чувствительность при рабочей постоянной времени обеспечивается применением на входе приемника малошумящего усилителя с температурой шумов менее 300 К. Низкочастотная часть радиометра выполнена на синхронных фильтрах. Установка требуемого диапазона измеряемых радиояркостных температур производится по командам с Земли.

В радиометре предусмотрена сквозная калибровка приемо-преобразовательного тракта с помощью

твердотельного СВЧ-генератора, работающего в шумовом режиме. Пройдя через antennу и все цепи приемника, калибровочный сигнал используется для организации режима автоматической стабилизации параметров РМ-08, а также в виде яркостного, периодически повторяющегося восьмиградационного клина выдается на фотобланке рядом с радиотепловым изображением. На время калибровки прием излучения из окружающей среды прекращается [3], а фаза опорного напряжения, подаваемого на синхронный детектор, изменяется на  $180^\circ$  [14].

Стабильность параметров комплекса радиофизической аппаратуры обеспечивается термостабилизацией основных узлов радиолокатора и радиометра.

Линии передачи информации РТВК имеют сравнительно узкие полосы передаваемых частот, согласованные со скоростью передачи оптической информации. При этом МСУ-М осуществляет построчный обзор земной поверхности в диапазоне углов  $\pm 53^\circ$  от надира. Скорость сканирования МСУ-М составляет четыре строки в секунду и согласована с временем строчной развертки фототелеграфного аппарата, являющегося выходным прибором пунктов приема информации. Поэтому для трансляции совместных изображений информация РЛС БО и РМ-08 приводится к такому же виду, что позволяет разместить ее на том же бланке фототелеграфного аппарата, заняв часть зоны информации МСУ-М, лежащей далеко за пределами выбранной совместной полосы обзора, и согласовав скорости ее передачи.

Для этого сигналы с выходов радиолокатора и радиометра подаются на аналого-цифровые преобразователи в соответствующие каналы БОС, затем стробируются и заносятся в соответствующие ячейки памяти буферного регистра. В буферном регистре памяти в канале РЛС БО для уменьшения дисперсии флуктуаций уровней принятого сигнала производится их накопление [20]. Кроме того, для выравнивания яркости изображения по строке в обоих каналах производится коррекция уровней. При этом в канале РЛС БО устраняется зависимость уровня сигналов от изменения наклонной дальности до исследуемого элемента.

После выполнения этих процедур сигналы переносятся в соответствующие ячейки выходного регистра.

В блок обработки сигналов информация, получаемая РЛС БО и РМ-08, поступает с различными геометрическими искажениями вдоль строки. Это связано с тем, что строка РМ формируется со скоростью, пропорциональной изменению угла обзора, а строка РЛ — со скоростью, пропорциональ-

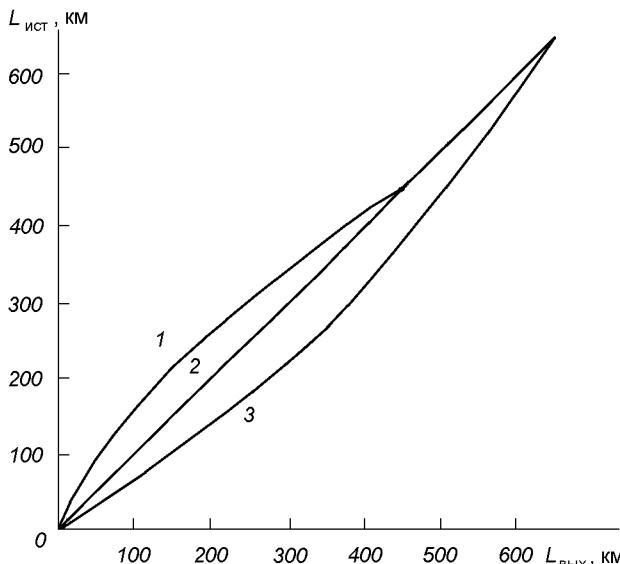


Рис. 6. Эффективность геометрической коррекции положения точек в полосе обзора на радиоизображениях от их действительного расположения на поверхности Земли: 1, 3 — РЛС БО и РМ-08 до коррекции; 2 — РЛС БО и РМ-08 после коррекции

ной изменению наклонной дальности. С целью устранения геометрических искажений масштаба информации из выходного регистра считывается по нелинейному во времени закону. Эффективность такой геометрической коррекции иллюстрирует рис. 6, на котором приведены зависимости положения точек в полосе обзора  $L_{\text{вых}}$  на радиоизображении от действительного их расположения на поверхности Земли  $L_{\text{ист}}$ . Кривая 1 соответствует РЛС БО, кривая 3 — радиометру до коррекции и кривая 2 — РЛС БО и РМ-08 после коррекции.

Для согласования скорости поступления информации СКРМ 1 строка/с со скоростью считывания 4 строки/с информация с выходного регистра канала РМ-08 считывается четыре раза в секунду.

Хронизатор обеспечивает синхронную работу всех трех датчиков.

Геометрическая схема размещения секторов наблюдения каждого из датчиков системы приведена на рис. 7. Ширины полос обзора РМ-08 и МСУ-М выбраны существенно большими, чем РЛС БО. Это связано с тем, что ширина и положение точек начала и конца полосы обзора каждого из датчиков на земной поверхности существенным образом зависят от изменения в процессе эксплуатации высоты ИСЗ и параметров его ориентации (углов крена, рыскания и тангла). Проиллюстрируем это влияние на примере вариаций высоты ИСЗ.

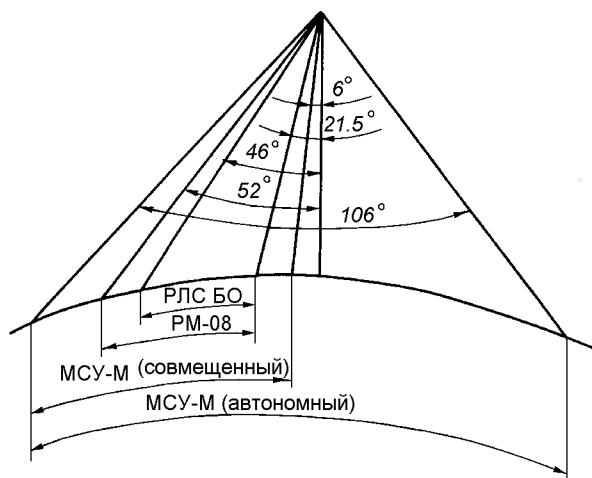


Рис. 7. Схема размещения секторов наблюдения датчиков системы

Увеличение высоты ИСЗ приведет к тому, что при фиксированных значениях начального и конечного углов секторов сканирования ширина полосы обзора РМ-08 и МСУ-М увеличится. Увеличится и расстояние по земной поверхности от подспутниковой точки до начала полосы обзора. Для РЛС БО увеличение высоты ИСЗ при фиксированных значениях наклонной дальности до исследуемых участков поверхности (времени прихода отраженного сигнала) приведет к уменьшению расстояния от подспутниковой точки до начала полосы обзора и ее сужению. Уменьшение высоты ИСЗ приведет к противоположным изменениям.

Вариации высоты ИСЗ приведут таким образом ко взаимному смещению на радиоизображениях участков исследуемой поверхности. На рис. 8 приведено изменение ошибки привязки  $\Delta S$  (несовпадение точек в полосах обзора РЛС БО и РМ-08) вдоль полосы обзора  $L$  при различных отклонениях высоты  $\Delta H$  для средней высоты  $H_{\text{ср}} = 650$  км.

Изменения в процессе эксплуатации параметров ориентации также будут приводить к «разбежке» полос обзора датчиков комплекса. Влияние изменения угла крена  $k$  на ошибку привязки изображений  $\Delta S$  вдоль полосы обзора  $L$  показано на рис. 9.

С целью уменьшения влияния этих факторов на ширину совмещенной полосы обзора всех трех датчиков, полосы обзора РМ-08 и МСУ-М выбираются больше, чем РЛС БО, а в канале обработки информации РЛС БО в БОС предусмотрена возможность установки необходимых значений наклонной дальности (времени задержки) начала полосы обзора по

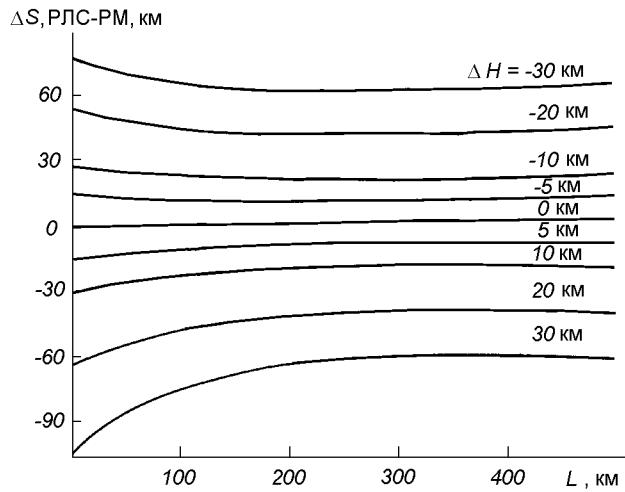


Рис. 8. Ошибки взаимной привязки элементов радиолокационного и радиотеплового изображений при вариациях высоты ИСЗ

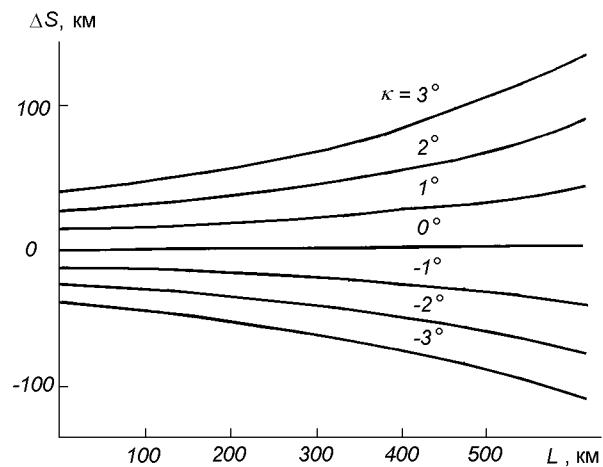


Рис. 9. Ошибки взаимной привязки элементов РЛ и РМ изображений при вариациях угла крена ИСЗ

командам с Земли на основе прогноза высоты ИСЗ над интересующим районом для совмещения начальных участков полос обзора датчиков.

Система дистанционного зондирования ИСЗ «Січ-1» обеспечивает возможность как комплексного (РЛС БО, РМ-08 и оптика), так и раздельного включения аппаратуры в любой комбинации без изменения масштабов изображения в «совмещенном» режиме и с изменением масштаба радиоизоб-

ражений в режимах «автономный 1» (РЛС БО и РМ-08) и «автономный 2» (только РЛС БО).

Структура строки информационного кадра в различных режимах работы для восходящего витка приведена на рис. 10 (*a* — в совмещенном режиме, *б* — в режиме «автономный 1», *в* — в режиме «автономный 2», *г* — в режиме «автономный МСУ-М»).

На информационном бланке, полученном с ИСЗ

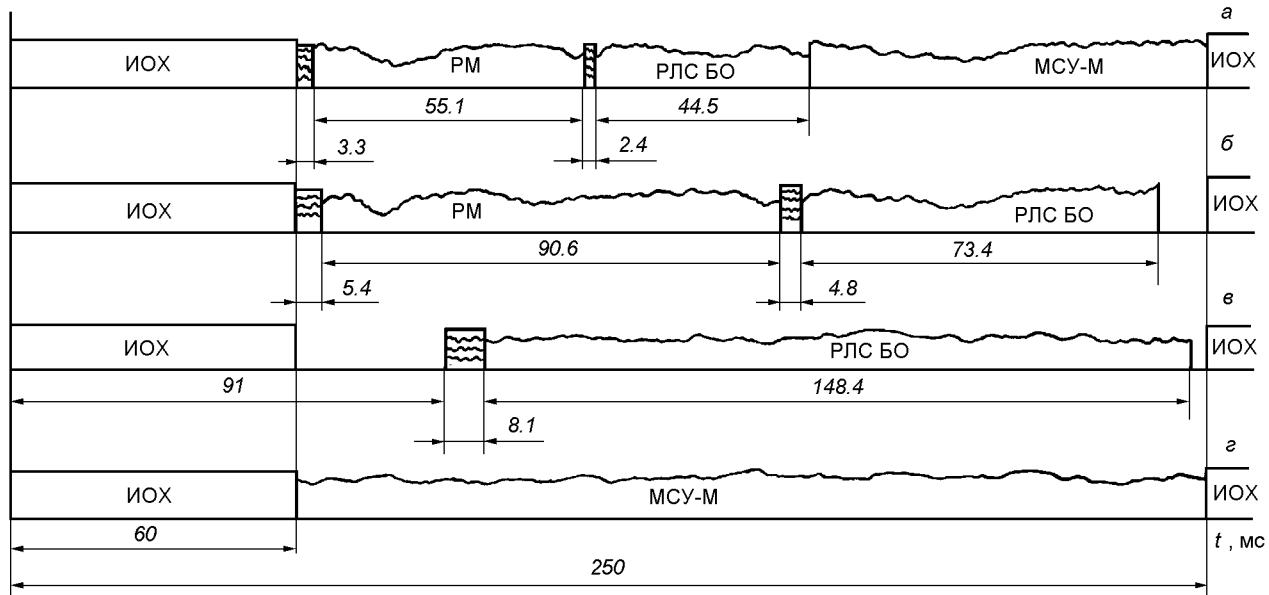


Рис. 10. Структура строки информационного кадра в различных режимах работы: *а* — в «совмешенном» режиме, *б* — в режиме «автономный 1», *в* — в режиме «автономный 2», *г* — в режиме «автономный МСУ-М»

## Основные параметры приборов комплекса РФА ИСЗ «Січ-1»

Параметр	РЛС БО	РМ-08	Примечание
Длина волны, см	3.1	0.82	
Поляризация	ВВ	Г	
Диапазон углов наблюдения	20°—46°	21°—51°	от надира
Ширина ДН антенны			
— в азимутальной плоскости	0.2°	0.8°	
— в угломестной плоскости	42°	0.5°	
Пространственное разрешение, км			среднее в полосе обзора
— при передаче по М-линии	2 × 2.5	10 × 15	
— при передаче по ДМ-линии	0.8 × 2.5	10 × 15	
Чувствительность приемника	-140 дБ/Вт	3.5 К	при рабочей $\tau = 0.008$ с
Мощность передатчика	100 кВт		в импульсе
Длительность импульса, мкс	3		
Время интегрирования		8 мс	
Частота повторения импульсов	Гц	100	
Скорость сканирования, 1/с		1	строка в с
Угол отворота антенны от надира, град	35	45	нормаль к апертуре
Диапазон измеряемых температур, К		110—330 150—250	по командам с Земли
Высота орбиты ИСЗ, км	650		средняя
Наклонение орбиты	82.6°		
Полоса обзора, км	450	550	для средней высоты

на нисходящем витке в «совмещенном» режиме (рис. 5) для удобства восприятия север расположен вверху изображения. При этом цикл сканирования соответствует движению от правой грани изображения к его левой грани. Правую часть информационного поля занимает радиотепловое изображение участка территории СНГ от Белого до Черного морей, в центре — радиолокационное изображение этого же района, слева — его оптическое изображение. В начале информационных полей радиометра и радиолокатора расположены калибровочные клинья, слева от оптического изображения находится служебная информация РТВК.

Основные параметры приборов комплекса радиофизической аппаратуры ИСЗ приведены в таблице.

С помощью комплекса РФА ИСЗ «Січ-1» регулярно проводились съемки территории Украины. Полученная информация использовалась в научных и практических целях широким кругом отечественных потребителей. Весьма эффективным было использование полученных данных для гидрометеорологических наблюдений, в том числе при разработке прогнозов прохождения весеннего паводка весной 1996 года. Комплекс РФА ИСЗ «Січ-1» успешно применялся для океанографических исследований, изучения крупномасштабных процессов взаимодействия океана и атмосферы (в том числе ураганов, тайфунов), наблюдения ледяных покровов Арктики и Антарктики.

1. А. с. 1111582 СССР, МКИ<sup>4</sup> Г 01 С 13/95. Способ дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли / В. П. Шестопалов, Ю. А. Афанасьев, Б. Е. Хмыров и др.—№ 3581264; Заявл. 03.05.83.
2. А. с. 1200708 СССР, МКИ<sup>4</sup> Г 01 В 1/00. Система метеорологического зондирования / В. П. Шестопалов, Ю. А. Афанасьев, В. А. Комяк и др.—№ 3670976; Заявл. 22.08.85.
3. А. с. 1217101 СССР, МКИ<sup>4</sup> Г 01 С 13/95. Сканирующий радиометр для дистанционного зондирования / А. П. Евдокимов, В. А. Комяк, В. В. Крыжановский и др.—№ 3837351; Заявл. 08.11.85.
4. А. с. 1236910 СССР, МКИ<sup>4</sup> Г 01 С 13/95. Радиолокационное устройство для дистанционного зондирования / А. С. Курекин, В. Б. Ефимов, А. И. Калмыков и др.—№ 3824366; Заявл. 08.02.84.
5. А. с. 1251691 СССР, МКИ<sup>4</sup> Г 01 С 13/95. Радиометр для оперативного дистанционного зондирования и блок сканирования / А. П. Пичугин, М. В. Бухаров, В. А. Комяк и др.—№ 3788385; Заявл. 25.01.86.
6. А. с. 1272935 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 01 Q 13/20. Антенна миллиметрового диапазона волн / С. Д. Андренко, А. П. Евдокимов, В. В. Крыжановский и др.—№ 3779965; Заявл. 22.07.84
7. Ворсин Н. Н., Глотов А. А., Мировский В. Г. и др. Натурные радиотепловые измерения пенных образований // Исслед. Земли из космоса.—1982.—№ 3.—С. 98—102.
8. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В., Провалов С. А. Современное состояние сканирования лучом ДН в антеннах радиометрических комплексов миллиметрового диапазона // Радиофизические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 160—166.
9. Ефимов Е. Б., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Радиолокационная система дистанционного зондирования морской поверхности ИСЗ серии «Океан» // Материалы 16

- Междунар. науч.-техн. конф. секции радиосвязи и радионавигации СПБ НТОВТ. — М., 1992.—Т. 1.—С. 303.
10. Калмыков А. И., Ефимов В. Б., Кавелин С. С. и др. Радиолокационная система ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1984.—№ 5.—С. 84—93.
  11. Калмыков А. И., Курекин А. С., Ефимов В. Б. и др. Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 3.—С. 76—83.
  12. Калмыков А. И., Курекин А. С., Комяк В. А. и др. Радиолокационная система бокового обзора для исследования Земли из космоса // Тр. ГосНИЦИПР.—1986.—Вып. 25.—С. 21—36.
  13. Комяк В. А., Курекин А. С., Цымбал В. Н., Шило С. А. Комплексирование активных и пассивных радиолокационных систем аэрокосмического базирования для решения океанографических задач // Материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. по радиосвязи и навигации. — М.: Мортехинформреклама, 1992.—С. 304.
  14. Кочеров С. А. Использование высокотемпературных эталонов для калибровки микроволновых радиометров // Тр. ГосНИЦИПР.—1982.—Вып. 14.—С. 19—23.
  15. Мельник Ю. А. Радиолокационные методы исследования Земли. — М.: Сов. радио, 1980.—284 с.
  16. Пичугин А. П., Комяк В. А., Малышенко Ю. И. Влияние атмосферы и снежного покрова на излучательные характеристики льдов // Неконтактные методы и средства измерений океанографических параметров. — М.: Гидрометеоиздат, 1986.—С. 119—123.
  17. Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Нараева М. К. и др. Исследование океана с помощью многоспектральных сканирующих устройств малого разрешения // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 3.—С. 70—76.
  18. Селиванов А. С., Тучин Ю. М. Радиотелевизионный комплекс спутников «Метеор» для исследования природных ресурсов Земли // Исслед. Земли из космоса.—1981.—№ 5.—С. 28—34.
  19. Сластенко А. Н., Иголкин В. В. Долгополова Л. А. Методика расчета нерезонансной волноводнощелевой антенны с большой апертурой и определения допусков на конструктивные параметры. — Харьков, 1983.—20 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т радиофизики и электроники; № 233).
  20. Фетисов А. Б. Особенности бортовой обработки информации при дистанционном зондировании природной среды // Радиофизические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 60—64.
  21. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическим методом // Докл. АН СССР.—1985.—284, № 1.—С. 98—102.
  22. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Радиолокационная система бокового обзора для исследования Земли ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 2.—С. 71—75.
  23. Onstott R. G., Moor R. K., Gogineni S., Delkev C. Four years of law-altitude sea ice broadband backscatter measurements // IEEE Trans. Ocean Eng.—1982.—OE-7, № 1.—P. 44—50.

#### RADIOPHYSICAL INSTRUMENTATION COMPLEX OF THE «SICH-1» SATELLITE

V. I. Dranovskiy, V. V. Dyunyashov, A. P. Evdokimov, V. B. Efimov, V. V. Igolkin, A. I. Kalmykov, V. A. Komyak, V. V. Kryzhanovskiy, A. S. Kurekin, V. Yu. Levantovskiy, A. S. Levda, V. V. Rybin, Yu. D. Saltykov, A. B. Fetisov, V. N. Tsymbal, S. A. Shilo, and S. E. Yatsevich

Based on the analysis of advantages of complex use of the information from active and passive radar systems, we ground the structure and parameters of a space-based radiophysical instrumentation for remote sensing in a ground — atmosphere system. We give some examples of observations of natural environment and analyse the results obtained.

УДК 621.396.962.4+551.507.362.2

**Сканирующий  
ИСЗ                    СВЧ-радиометр  
«Січ-1»                    РМ-08**

**В. А. Комяк<sup>1</sup>, А. С. Левда<sup>2</sup>, В. В. Рыбин<sup>3</sup>,  
С. А. Шило<sup>1</sup>, С. Е. Яцевич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут радіофізики і електроніки НАН України, Харків

<sup>2</sup>Центр радіофізичного зондування Землі НАН України і НКА України, Харків

<sup>3</sup>Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

*Надійшла до редакції 11.03.98*

Обговорюється призначення радіометричної системи РМ-08 ПІСЗ «Січ-1», особливості її структури, принципи та технічні рішення, які покладені в основу схем сканування та калібровки.

Сканирующий СВЧ-радиометр (СКРМ) 8-мм диапазона волн предназначен для исследования земной поверхности, ледяных покровов и океана в составе комплекса радиофизической аппаратуры (РФА) ИСЗ «Січ-1». Комплекс РФА включает в себя также радиолокатор бокового обзора (РЛС БО) 3-см диапазона волн [4]. Выходные данные радиометра и радиолокатора на борту ИСЗ объединяются с синхронно получаемой информацией радиотелевизионного комплекса РТВК, оснащенного многоспектральным сканером МСУ-М [6], в единый информационный поток, содержащий три синхронно формируемые изображения (радиотепловое, радиолокационное и оптическое) одних и тех же участков земной поверхности, и транслируются по стандартным линиям передачи в частотных диапазонах 137 Мгц и 465 Мгц на приемные пункты.

Синхронные данные радиолокационных и радиометрических наблюдений в сочетании с видеинформацией сканера не только дополняют друг друга, но и позволяют в ряде случаев избежать неоднозначности интерпретации результатов зондирования [8].

© В. А. КОМЯК, А. С. ЛЕВДА, В. В. РЫБИН,  
С. А. ШИЛО, С. Е. ЯЦЕВИЧ, 1998

Принадлежность РМ-08 комплексу РФА определила выбор как принципов обзора пространства, так и схемы построения прибора.

Выбор рабочей длины волны  $\lambda \approx 8$  мм и горизонтальной поляризации принимаемого излучения определяется оптимизацией комплекса к решению задач наблюдения океана и льдов [8]. Необходимость одновременного с РЛС БО наблюдения одних и тех же участков поверхности Земли в совмещенной полосе обзора определила выбор сектора углов сканирования РМ-08 (начальный угол  $\geq 20^\circ$  от надира, сектор углов  $\approx 30^\circ$ ). Исходя из требований единой строчно-кадровой структуры построения информационного потока, было выбрано линейное сканирование диаграммой направленности антенны в плоскости, ортогональной вектору линейной скорости ИСЗ. Такой вариант сканирования, несмотря на недостатки, связанные с изменением угла наблюдения от положения луча антенны, обеспечивает оптимальную, с точки зрения времени на получение информации, чувствительность системы (максимально возможное время интегрирования).

Функционально СКРМ состоит из сканирующей антенны, радиометрического приемника, устройств

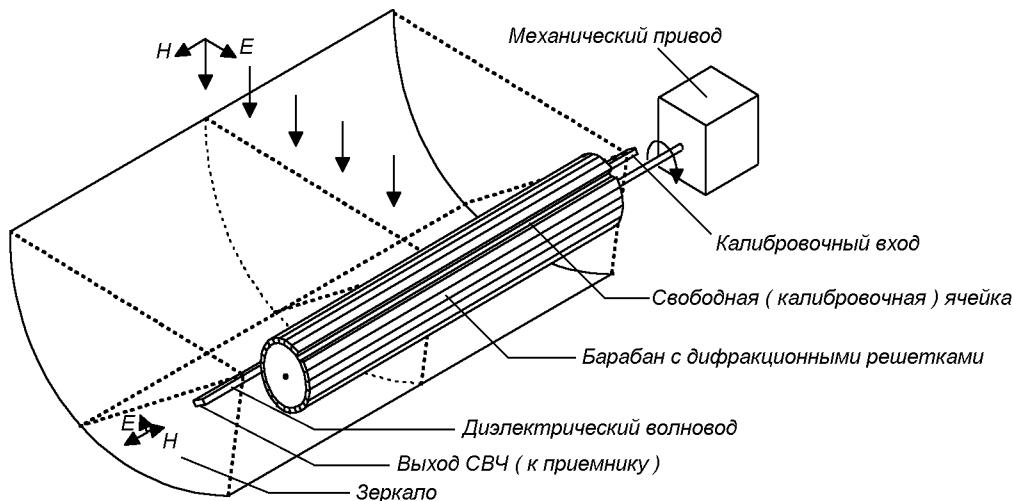


Рис. 1. Схема антенны РМ-08

питания, управления и телеметрического контроля. С выхода радиометрической системы сигнал поступает в блок обработки (БОС), где преобразуется в цифровую форму. В БОС формируется строка радиометрического изображения, производится коррекция геометрических искажений, вызванных сферичностью Земли, после чего осуществляется вывод радиометрической информации в составе строки совмещенного (радиометрического, радиолокационного и оптического) изображения; при этом за счет внутреннего тиражирования строк согласуются частоты сканирования РМ-08 (1 Гц) с частотой строк выходного изображения (4 Гц) [7]. На выходе БОС сигнал преобразуется в аналоговую форму и поступает на модулятор передатчика линии радиосвязи.

#### СКАНИРУЮЩАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА

Сканирующая антенна системы РМ-08 разработана в ИРЭ НАНУ на основе принципов преобразования поверхностных волн в объемные [1, 3]. Антенна включает неподвижный рефлектор в виде вырезки из параболического цилиндра и сканирующий линейный облучатель, вынесенный за пределы апертуры, выполненный на основе диэлектрического волновода, связанного посредством электромагнитного поля с одной из дифракционных решеток из их набора, размещенного на вращающемся цилиндре вдоль его образующих [3]. Положение диаграммы направленности (ДН) антенны определяется параметрами взаимодействующей дифракционной решетки. При вращении цилиндра вокруг своей оси дифракционные решетки последовательно взаимо-

действуют с полем диэлектрического волновода и, как следствие этого, путем выбора параметров рассеивающих дифракционных решеток могут быть реализованы требуемые пространственные положения ДН, сектор и закон сканирования. Схематическое изображение антенны приведено на рис. 1.

Характерной особенностью выбранной электродинамической схемы антенны является наличие «клиновидной» связи между каждым из рассеивателей и линией поверхностных волн. Такая несимметричная связь приводит к тому, что искажения диаграммы направленности, характерные для антенн с боковой запяткой в области углов, близких к нормали к плоскости апертуры, в данной антенной конструкции выражены слабо и практически не влияют на характеристики принимаемого сигнала. Реализованное распределение поля вдоль облучателя близко к косинусоидальному. В ортогональной плоскости требуемая ДН облучателя формируется с помощью рупора, в который заключен диэлектрический волновод.

С целью исключения приема с направлений, соответствующих высшим гармоникам поверхностных волн, была ограничена максимальная величина периода рассеивателей. Это обстоятельство явилось причиной несимметричности углового сектора сканирования, составляющего  $+6^\circ \dots -24^\circ$  относительно нормали к плоскости апертуры. В рабочем положении плоскость апертуры расположена под углом  $45^\circ$  к надиру, что позволяет получать наилучшее, в среднем по полосе обзора, пространственное разрешение.

Требуемый порядок смены рассеивателей реализуется с помощью механического привода [2], выполненного на основе редуцированного шагового

двигателя. Синхронизация последнего от внешнего опорного источника обеспечивает построчную привязку данных радиометра к информации других систем, входящих в комплекс научной аппаратуры ИСЗ.

Для реализованных размеров зеркала  $1150 \times 580 \text{ мм}^2$ , при длине облучателя 950 мм, ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ составляет  $0.5^\circ \times 0.8^\circ$  при уровне боковых лепестков не хуже  $-17$  дБ. Для согласования рабочих углов наблюдения радиолокатора и радиометра сектор сканирования составляет  $30^\circ$  в диапазоне углов  $21^\circ - 51^\circ$  от надира. Частота сканирования — 1 строка в секунду.

Значительная длина облучателя вызывает заметный уровень его собственных потерь в 8-мм диапазоне волн ( $-0.8$  дБ с фидерным трактом), что может приводить к вариациям параметров выходной шкалы радиометра при изменении термодинамических температур облучателя и фидера в процессе эксплуатации. Поэтому, несмотря на независимость собственных потерь в облучателе антенны от углового положения луча, необходимо включение параметров антенного блока в алгоритм калибровки.

## РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК

Радиометрический приемник выполнен по одноканальной супергетеродинной схеме с модулятором на входе. Сверхвысокочастотная часть приемного тракта разработана на базе волноводной техники с основным сечением волновода  $7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$ . Для реализации высокой чувствительности во входном тракте применен параметрический усилитель вырожденного типа с шумовой температурой  $T_{\text{ш}} \leq 300 \text{ К}$  [5]. Все активные СВЧ-элементы выполнены на полупроводниковых приборах. Центральная частота рабочей полосы — 36.61 ГГц, частота гетеродина выбрана равной 37.5 ГГц.

Так как антенная система обладает ярко выраженной дисперсией (углочастотный коэффициент составляет  $0.8^\circ$  на процент изменения частоты), для исключения приема излучения с «зеркального» направления ДН требуется введение в приемнике однополосного режима работы. С этой целью за счет рабочих характеристик параметрического усилителя, модулятора и ферритовых устройств, реализовано подавление сигнала в верхней боковой полосе приема порядка  $-30$  дБ.

Для уменьшения влияния дисперсии антенны на ширину ДН полоса приемника ограничена 270 МГц, для чего в тракте промежуточной часто-

ты установлен шестизвенный полосовой фильтр на встречных стержнях. Центральная частота фильтра — 890 МГц. Поскольку все остальные элементы тракта более широкополосны, характеристика фильтра определяет результирующую амплитудно-частотную характеристику системы.

В тракте низкой частоты осуществляются операции синхронной фильтрации, синхронного детектирования и интегрирования выходного сигнала. Выходной усилитель постоянного тока (УПТ) схемы низкочастотной обработки имеет два фиксированных значения коэффициента передачи, устанавливаемых по командам с Земли. При этом информация представляется в двух температурных масштабах: шкалы радиояркости изображений соответствуют диапазонам температур 110—330 К (для наблюдений океана и суши) или 150—250 К (для наблюдения льдов). Кроме этого, по командам с Земли предусмотрена возможность смещения выходной шкалы радиометра относительно сетки входного аналого-цифрового преобразователя БОС, что позволяет (в случае необходимости) компенсировать составляющую систематической погрешности измерений, связанную с возможной ошибочной оценкой рабочей шумовой температуры антенны при ее наземной калибровке.

Структурная схема радиометрического приемника приведена на рис. 2.

## КАЛИБРОВКА РМ-08

Калибровка радиометра осуществляется с помощью сигнала от эталонного шумового полупроводникового генератора (ГШ), подключенного к противоположному концу диэлектрического волновода облучателя. В течение калибровочной части цикла сканирования прием внешнего излучения исключается, для чего часть цилиндрической поверхности выполнена гладкой и не содержит рассеивателей, поэтому сигнал шумового генератора проходит по волноводу облучателя антенны на вход радиометрического приемника без какого-либо влияния со стороны внешних факторов.

Второй уровень калибровочного сигнала, соответствующий физической температуре входного тракта радиометра, создается собственным радиоизлучением аттенюатора, установленного в тракте ГШ; физические температуры облучателя и аттенюатора измеряются с помощью прецизионных датчиков температуры и передаются в общем потоке телеметрических данных.

Таким образом, калибровочные сигналы подаются на вход антенны; в результате ее облучатель и

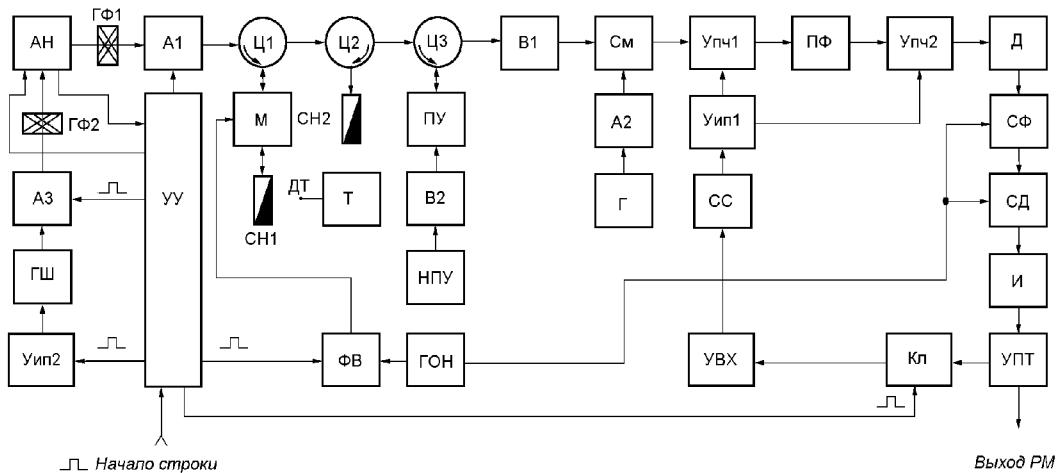


Рис. 2. Структурная схема РМ-08: А — аттенюатор; АН — антenna; В — вентиль; Г — гетеродин; ГОН — генератор опорного напряжения; ГФ — гермофланец; ГШ — генератор шума; Д — детектор; ДТ — датчик температуры; И — интегратор; Кл — ключ; М — модулятор; НПУ — накачка параметрического усилителя; ПУ — входной малошумящий параметрический усилитель; СМ — преобразователь частоты; СД — согласованная нагрузка; СС — схема согласования; СФ — синхронный фильтр; Т — термостат; УВХ — устройство выборки-хранения; УИП — управляемый источник питания; УПТ — усилитель постоянного тока; УПЧ — усилитель промежуточной частоты; УУ — управляющее устройство; ФВ — фазовращатель; Ц — ферритовый циркулятор

фидерный тракт включаются в калибровочный цикл. Следует отметить, что в данной схеме облучатель антены выполняет функции управляемого переключателя, в связи с чем из приемного тракта исключаются соответствующие волноводные элементы, что снижает общую шумовую температуру системы.

В РМ-08 предусмотрены два режима калибровки: диагностический и оперативный.

Диагностический режим включается перед началом рабочего цикла и состоит в измерении двух калибровочных уровней, длительностью 30 с каждый, при увеличенном времени интегрирования ( $\tau = 1$  с), с передачей данных как по телеметрическому каналу связи — для подтверждения правильного функционирования аппаратуры СКРМ, так по информационным радиолиниям с представлением результата в поле радиотеплового изображения — для проверки функционирования РМ канала БОС и линии передачи.

Режим оперативной калибровки синхронизирован с циклами вращения цилиндра облучателя и с другими системами радиофизического комплекса. В рабочей части цикла сканирования, соответствующей наблюдению земной поверхности, шумовой генератор выключен и второй вывод облучателя оказывается нагруженным на СВЧ нагрузку в виде аттенюатора с низким уровнем отражения.

Для формирования сигналов яркостной восьми-

градационной шкалы, располагаемой на выходном информационном бланке рядом с радиотепловым изображением и необходимой для оперативного анализа получаемой информации в пунктах приема, также используется шумовой сигнал калибровочного генератора, ослабленный в заданное для каждой градации количество раз управляемым  $p$ - $i$ - $n$ -аттенюатором. При этом фаза опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор, на время включения ГШ изменяется на  $180^\circ$ .

При оперативной калибровке используются два вида калибровочных сигналов. Первый — программируемый уровень калибратора, используемый для формирования на изображении градационной яркостной шкалы, второй — фиксированный уровень излучения, необходимый для работы схемы стабилизации коэффициента передачи приемо-преобразовательного тракта.

Отклики на опорные калибровочные импульсы, несущие информацию о коэффициенте передачи, стробируются и с предварительного каскада УПТ поступают на схему автоматической стабилизации коэффициента передачи, где выделяется их среднее значение и сигнал рассогласования по отношению к опорному уровню используется для регулирования коэффициента усиления тракта.

Временная диаграмма работы основных устройств радиометрической системы приведена на рис. 3.

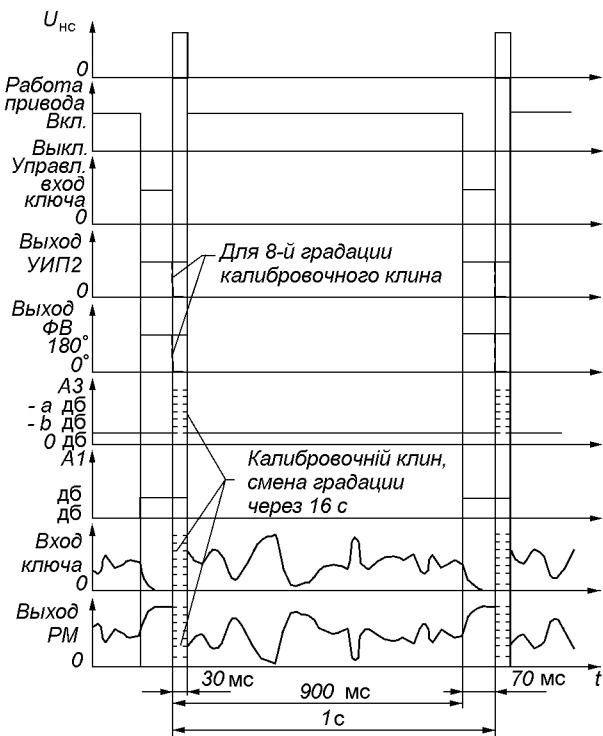


Рис. 3. Временная диаграмма работы основных устройств радиометрической системы

### КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ РМ-08

Конструктивно элементы системы размещены в трех блоках — двух герметичных — сверхвысокочастотном (СВЧ) и блоке питания и управления (БПУ), размещаемых на откидных панелях ИСЗ, и в блоке низкой частоты (БНЧ), установленном в аппаратурном отсеке спутника. Блок СВЧ установлен на антенну и соединен с ее облучателем волноводными фидерами. Все его элементы размещены на термостабилизированной плате, теплоизолированной от кожуха блока. Для снижения теплообмена платы за счет конвекции и излучения, свободный внутренний объем блока заполнен гранулами пенополистирола. Терморазвязывающие волноводные связи между термоплитой и кожухом выполнены из тонкостенного волновода из нержавеющей стали с серебряным покрытием. Гермоблок СВЧ имеет два волноводных гермофланца (вход радиометрического приемника и выход калибровочного генератора). В гермофланцах в качестве развязывающих элементов применены слюдяные пластины толщиной 0.04 мм, что обеспечило потери сигнала менее 0.1 дБ. Терmostатирование активное, с рабочей температурой платы 316 К при диапазоне изменения температур кожуха блока СВЧ 233—313 К. Датчик термостата установлен на эталонной нагрузке модулятора и обеспечивает точность стабилизации температуры 0.2 К.

Рис. 4. Внешний вид антенной системы РМ-08 с блоком СВЧ (вверху) и блоком БНЧ (внизу)

На рис. 4 представлен внешний вид антенной системы РМ-08 с блоком СВЧ (вверху) и блока БНЧ (внизу).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информативность комплексов дистанционного зондирования типа «Океан-01», «Січ-1» с пространственно совмещенными полосами обзора поверхности для радиолокационного, радиометрического и оптического датчиков подтверждена в ходе многочисленных научных экспериментов и оперативных наблюдений Земли из космоса. Опыт эксплуатации в составе этих комплексов радиометрических систем типа РМ-08 позволяет сделать вывод о целесообразности введения в состав бортовых аппаратурных комплексов сканирующих радиометрических систем со «средним» пространственным разрешением порядка 5—15 км. Существенного увеличения информативности следует ожидать при увеличении числа поляризационных и частотных каналов радиометрической системы, при повышении абсолютной точности измерений и улучшении пространственного разрешения, а также при проведении комплексной наземной тематической обработки данных, полученных датчиками разных типов. Функционирование РМ-08 в составе комплекса радиофизической аппаратуры также подтвердило эффективность примененных методов обзора пространства и калибровки, основанных на использовании дифракционных структур в качестве элементов приемного антенного раскрыва для сверхвысокочастотных радиометрических систем.

1. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестопалов В. П. Антенные решетки миллиметрового диапазона волн // Докл. АН СССР.—1978.—240, № 6.—С. 1340—1343.

2. А. с. 1251691 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 S 13/95. Радиометр для оперативного дистанционного зондирования и блок сканирования / А. П. Пичугин, М. В. Бухаров, В. А. Комяк и др.—№ 3788385; Заявл. 25.01.85; Опубл. 22.02.86, Бюл. № 2.
3. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В., Провалов С. А. Современное состояние проблемы сканирования лучом ДН в антенных радио-метрических комплексов миллиметрового диапазона // Радиометрические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 160—166.
4. Калмыков А. И., Курекин А. С., Ефимов В. Б. и др. Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 3.—С. 76—83.
5. Корогод В. В., Берлин А. С., Струков И. А. Методы проектирования вырожденных параметрических усилителей для бортовых приемных систем миллиметрового диапазона волн // Научная аппаратура для космических исследований. — М.: Наука, 1987.—С. 114—121.
6. Селиванов А. С., Тучин Ю. М. Радиотелевизионный комплекс спутников «Метеор» для исследования природных ресурсов Земли // Исслед. Земли из космоса.—1981.—№ 5.—С. 28—34.
7. Фетисов А. Б. Особенности бортовой обработки информации при дистанционном зондировании природной среды // Радиофизические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 60—64.
8. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическим методом // Докл. АН СССР.—1985.—284, № 1.—С. 98—102.

---

### SCANNING MICROWAVE RADIOMETER RM-08 OF THE «SICH-1» SATELLITE

V. A. Komyak, A. S. Levda, V. V. Rybin,  
S. A. Shilo, S. A. Yatsevich

We discuss design of the radiometer system RM-08 of the satellite «Sich-1», its structure, principles and engineering solutions used as the basis for its scanning and calibration systems.

УДК 528.88.551

## Особенности наблюдения снежного покрова радиолокационной системой бокового обзора ИСЗ «Січ-1»

**В. Б. Ефимов<sup>1</sup>, И. А. Калмыков<sup>1</sup>, С. Е. Яцевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Центр радиофізичного зондування Землі НАН і НКА України, Харків

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 24.02.98*

В роботі розглядаються теоретичні та практичні можливості дослідження снігового покриву у НВЧ-діапазоні радіолокаційною системою бокового огляду першого національного ШСЗ «Січ-1». Наводяться результати тематичної обробки зображень та рекомендації щодо прогнозування динаміки танення снігу.

Снежный покров оказывает существенное влияние на жизнедеятельность человека, поскольку его наличие определяет прежде всего энергетический и водный баланс поверхности Земли, имеющих большое значение для сельского хозяйства, гидрологии, экологии и пр.

Интенсивность весеннего половодья во многом определяется скоростью таяния снега. Талые воды переполняют водоемы и болота, восполняют запасы грунтовых вод, увлажняют почву, создавая запасы влаги, величина которых имеет большое значение для будущего урожая. При этом, наряду с выгодой от увеличения водных запасов, имеют место потери времени и материальных ресурсов, связанные с необходимостью расчистки от снега дренажных систем, и с последствиями затопления вовлеченных в хозяйственную деятельность территорий.

Для снежного покрова характерна высокая пространственная изменчивость физических свойств, обусловленная макро-, мезо- и микромасштабными процессами в атмосфере, рельефом, растительным покровом и т. п. В пределах одного климатического района аккумуляция снега происходит определенным, характерным для данных ландшафтных усло-

© В. Б. Ефимов, И. А. Калмыков, С. Е. Яцевич, 1998

вий, образом. При этом растительный покров, определяющий в основном пространственную изменчивость снежного покрова, сам оказывается под воздействием этой изменчивости. Хорошо известно влияние разных типов лесов на аккумуляцию снега.

Толщина снежного покрова является одной из основных характеристик, поскольку существует связь между толщиной снега и его свойствами, в частности с тепловым режимом, и как следствие, с его способностью изолировать поверхность Земли от внешних воздействий. Хотя температурные градиенты и обусловленный ими метаморфизм снежного покрова ярче выражены при небольшой глубине снега, снежный покров одинаковой толщины, находящийся на разных стадиях метаморфизма, может иметь различный температурный режим при сходных погодных условиях.

Снег может обладать разными физическими свойствами в зависимости от формы кристаллов. По мере уплотнения снежного покрова изменяется его толщина и теплопроводность, то есть необходимо учитывать его свойства за весь период существования. При этом очень важны периоды в начале

формирования снежного покрова, во время снеготаяния, и особенно — в период с резкими изменениями покрова в результате температурных перепадов.

Важнейшей характеристикой пространственного распределения снега является покрываемая им площадь. Наземные методы не всегда позволяют точно определить ее, особенно в районах с малым количеством наблюдательных станций.

Развитие дистанционных методов изучения снежных покровов позволило по-новому отнести к методам наблюдения и анализу данных.

Наибольшее распространение получили оптические методы дистанционного зондирования с использованием аэрокосмических носителей (аэрофотосъемка, оптические и ИК-сканеры), однако эффективность их применения существенно ограничивается требованием прозрачности атмосферы.

Свободными от указанного недостатка являются радиолокационные методы в СВЧ-диапазоне, положенные в основу радиолокаторов аэрокосмического базирования типа «Космос-1500» [1, 3]. Проведенные в 1980—1990-х гг. исследования с этими системами [2], позволили прогнозировать процессы весеннего снеготаяния и паводков на реках, а также другие критические ситуации при практической работе с данными первого национального спутника «Сич-1» [5].

#### ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ, ПОКРЫТОЙ СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ

Обратное рассеяние электромагнитных волн, регистрируемое радиолокатором бокового обзора ИСЗ (РБО), в зимний период определяются в основном рассеянием в слое снега, представляющим собой конгломерат кристаллов льда в воздушной среде. При этом большую роль играют эффекты рассеяния радиоволн на границах раздела «воздух—снег» и «почва—снег». Следовательно, при анализе результатов наблюдения необходимо учитывать эффекты как объемного, так и поверхностного зондирования.

При наличии снежного покрова наблюдается положительный радиолокационный контраст яркости между такими объектами, как долины рек и территории, находящиеся в междуречьях. Это явление объясняется тем, что при наличии снежного покрова основной вклад в величину удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) земной поверхности могут давать следующие механизмы рассеяния: рассеяние на шероховатой границе раздела «воздух—снег», рассеяние на объемных (внутренних) неоднородностях снега, рассеяние на шерохо-

ватой границе раздела «снег—почва» [6].

Рассеянием на подповерхностных неоднородностях почвы, как правило, можно пренебречь из-за экранирующего действия указанных трех механизмов рассеяния.

В зависимости от толщины и структуры снежного покрова, температуры и влажности почвы и снега, непосредственного воздействия солнечной радиации и других факторов (в том числе времени суток), относительный вклад перечисленных механизмов рассеяния может быть различным. Одним из основных параметров, определяющим характер рассеяния радиоволн снежным покровом, является глубина проникновения радиоволн (толщина скин-слоя) [4]:

$$\delta = \frac{\lambda\sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (\epsilon'' \ll \epsilon'). \quad (1)$$

В СВЧ-диапазоне для сухого снега при отрицательных температурах, как следует из [4], действительная часть  $\epsilon'$  практически не зависит от температуры и частоты и является функцией только плотности снега  $\rho_c$ , изменяясь от  $\epsilon' \approx 1.2$  при  $\rho_c = 0.1 \text{ г}/\text{см}^3$  до  $\epsilon' \approx 2.8$  при  $\rho_c = 0.8 \text{ г}/\text{см}^3$ . Плотность  $\rho_c$ , в свою очередь, определяется условиями выпадения снега (скорость ветра, температура и т. д.) и изменениями гидрометеоусловий в течение всего периода от момента образования снежного покрова до момента наблюдений. Затухание радиоволн при их распространении в снеге определяется тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'. \quad (2)$$

величина которого на частоте 10 ГГц изменяется примерно от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  при изменении температуры от  $-5^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$ . Подставляя указанные значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  в формулу (1) для  $\delta$ , получаем, что для сухого снега толщина скин-слоя может достигать величины нескольких метров. Если предположить, что объемные неоднородности снежной массы (элементарные рассеиватели) распределены равномерно по глубине и пренебречь экстинкцией, то приходим к выводу, что величина УЭПР, связанная непосредственно с объемным рассеянием, прямо пропорциональна толщине снежного покрова (сухого и однородного по глубине). При этом рассеянием на границе «воздух—снег» можно пренебречь по крайней мере по двум причинам: во-первых, из-за малого «контраста» (скачка  $\epsilon'$ ) на границе «воздух—снег», и во-вторых, из-за сравнительной «гладкости» поверхности снега в сантиметровом диапазоне радиоволн (по сравнению с шероховатостью открытой поверхности почво-грунтов). Что же касается рассеяния на границе «снег—поч-

ва», то вклад этого механизма при отрицательных температурах также является значительно ослабленным из-за близости значений  $\epsilon$  снега и промерзшей почвы, которые определяются в основном электродинамическими параметрами льда (при отсутствии свободной влаги). По мере повышения температуры и увеличения влажности  $m_v$  снега (появлением свободной воды) поглощение в снеге значительно увеличивается (при  $\rho_c \approx 0.25 \text{ г/см}^3$  и  $m_v \approx 2\%$  на частоте 10 ГГц  $\epsilon''$  увеличивается на три порядка и достигает значения 0.1). При этом  $\delta$  уменьшается до нескольких сантиметров, так что

рассеяние на поверхности почвы полностью экранируется даже тонким снежным покровом. При переходе от отрицательных температур к положительным, а тем более во время интенсивного таяния, должна наблюдаться инверсия контраста между долинами рек и междуречьями: появление в долинах рек больших площадей влажного снега со слаборазвитой (практически гладкой) поверхностью, а тем более участков воды, должно резко снижать УЭПР по сравнению с более шероховатой поверхностью границы раздела «воздух—снег» (влажная почва) в междуречьях. Зависимость  $\sigma_0$  от

Рис. 1. Радиолокационное изображение ИСЗ «Січ-1» от 21.03.96 г. и тематическая карта границы снежного покрова по данным ИСЗ и наземных пунктов ХГМЦ

толщины снежного покрова при этом полностью нивелируется, так как из-за малой величины  $\delta$  весь процесс рассеяния происходит в тонком приповерхностном слое толщиной не более 1 см (для  $\lambda = 3$  см).

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ  
ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЛ-ИНФОРМАЦИИ ИСЗ «СІЧ-1»  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ  
В ПЕРИОД СНЕГОТАЯНИЯ**

В спектре проблем изучения земной поверхности можно выделить задачи, связанные с использованием данных дистанционного зондирования для гидрологических наблюдений. К этим задачам относятся контроль динамики развития и таяния снежного покрова, состояние ледяного покрова на реках и внутренних водоемах, определения пространственных характеристик водного зеркала и т. д. Особенно актуальными гидрологические наблюдения являются в период прохождения весеннего

паводка. Процессы таяния снега и вскрытия рек и водоемов в весенний период года достаточно динамичны, в связи с чем для контроля прохождения паводка необходима оперативная текущая и прогнозическая информация, которая может быть получена с использованием космических систем дистанционного зондирования.

В течение зимне-весеннего периода 1996 г. ЦРЗЗ НКА и НАН Украины принимал участие в научно-практических работах по обеспечению информацией РБО ИСЗ «Січ-1» подразделений Укргидромета и других народнохозяйственных служб в период интенсивного таяния снега и прохождения весеннего паводка. Наряду с приемом и предварительной обработкой РЛ-информации отрабатывались методики тематической обработки данных РЛ-зондирования из космоса, а также принципы взаимодействия с подразделениями Укргидромета, занимающимися разработкой гидрологических прогнозов.

Примеры использования РЛ-информации для гидрологических прогнозов представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 2. Радиолокационные изображения бассейна р. Северский Донец в зимне-весенний период 1996 г.

Рис. 3. Зоны подтоплений в бассейне р. Днепр весной 1996 г.: а — радиолокационное изображение, полученное в весенний период, б — изображение, полученное в летний период, (в — см. продолжение на с. 32)

Рис. 3 (продолжение): *в* — интерпретация изображения *а*

На рис. 1 приведено РЛИ, полученное РБО ИСЗ «Січ-1» 21.03.96 г., и результаты тематической обработки. Как видно, положение границы распространения снежного покрова, полученное по данным РЛ наблюдений из космоса вполне удовлетворительно коррелирует с результатами снегомерной съемки. Принимая во внимание относительно редкую сеть наземных пунктов наблюдений подобная информация представляет значительный интерес при разработке прогнозов таяния снега.

Вместе с тем, как показал анализ РЛИ, существует и корреляция интенсивности РЛ-сигналов с толщиной и водностью снега, что при проведении дополнительных исследований может быть использовано для построения тематических карт пространственного распределения указанных характеристик снежного покрова. На тематической карте (рис. 1) показана линия раздела зон с различным влагосодержанием в снежном покрове. По данным ГМЦ Украины влагосодержание в северной части составляет 40 мм, а в южной — более 60 мм, что проявляется на РЛ-изображении темным тоном. Это подтверждает теоретические расчеты.

РЛ информация РБО ИСЗ «Січ-1», полученная в зимний период года, может использоваться и для прогнозирования зон подтоплений в период весеннего паводка. Так, на рис. 2 (РЛИ от 24.02.96 г.)

светлым тоном выделяются замерзшие поймы рек бассейна Днепра и бассейна реки Северский Донец. Вместе с тем на РЛИ от 04.04.96 г. в период весеннего паводка поймы этих же рек выделяются темным тоном. При этом пространственные размеры замерзших пойм и подтопленных участков в весенний период практически совпадают.

Методики обработки информации космических РБО для оценки пространственных характеристик разливов крупных водоемов с использованием элементов кластерного анализа рассмотрены в [3] и апробированы при экспериментах, выполненных РБО ИСЗ «Космос-1500» во время паводка на реке Амур в 1984 г. [3]. Пример использования указанной методики для выделения зон подтоплений в центральной части Украины представлен на рис. 3 (*а* — исходное изображение, полученное в весенний период, *б* — изображение, полученное в летний период, *в* — интерпретация изображения *а*). На летнем изображении визуально не идентифицируются поймы рек Ворскла и Северский Донец, которые явно просматриваются на изображении, полученном в весенний период.

Анализ радиолокационных изображений территории Украины полученных РБО ИСЗ «Січ-1» в зимне-весенний период 1996 г. изображений показывает, что по данным радиолокационной съемки

из космоса возможно наблюдение динамики развития снежного покрова и определение границ снеготаяния, а в комплексе с наземными измерениями можно создать оперативную службу прогнозирования критических ситуаций, связанных со снеготаянием, разливом рек, подтоплением берегов и т. п.

1. Калмыков А. И., Ефимов В. Б., Кавелин С. С. и др. Радиолокационная система ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1984.—№ 5.—С. 84—93.
2. Кулемин Г. П., Харченко Т. Н., Яцевич С. Е. Дистанционное зондирование снега радиолокационными методами. — Харьков, 1992.—36 с.—(Препринт / НАН Украины. ИРЭ; № 92 - 8).
3. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова, — Л.: Гидрометеоиздат, 1990.—200 с.
4. Улаби Ф. Т. Радиолокационные сигнатуры земной поверхности и контроль возобновляемых ресурсов // ТИИЭР.—1982.—70, № 12.—С. 43—64.

5. Dranovsky V. I., Tsymbal V. N., Kalmykov I. A. and al. Possibilities of Ekological Enviroment Monitoring the using SICH-1 Spasecraft // Proc. of fourth Ukraine—Russia—China Simposium on spase science and technology. — Kyiv, 1996.— Vol. 1.—P. 1—4.
6. Hoekstra P., Deleney A. Dielectric properties of soils at VHF microwave frequencies // J. Geophys. Res.—1974.—79.— P. 1699.

---

#### PECULIARITIES OF SNOW COVER OBSERVATIONS WITH THE SIDE-LOOKING RADAR OF THE «SICH-1» SATELLITE

V. B. Efimov, I. A. Kalmykov, S. E. Yatsevich

We analyze a possibility to investigate snow cover in the X-band with the side-looking radar of the first Ukrainian satellite «Sich-1». Some results of image processing and recommendations on the snow melting dynamics prediction are presented.

УДК 528.8.04

## Автоматическая радиолокационных дистанционного внутренняя систем зондирования калибровка

**С. Е. Яцевич<sup>2</sup>, А. С. Курекин<sup>1</sup>, В. Н. Уваров<sup>2</sup>, А. С. Левда<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Центр радіофізичного зондування Землі НАН і НКА України, Харків

<sup>2</sup>Інститут радіофізики і електроніки НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 20.03.98*

Розглядаються питання автоматичної внутрішньої калібровки бортових радіолокаторів бокового огляду дистанційного зондування поверхні Землі типу «Космос-1500», «Січ-1», літакових систем — «Аналог» та МАРС. Приводяться оцінки похибок вимірювань кількісних значень питомої ефективної площин розсіяння зондованих поверхонь та результати радіолокаційної зйомки тестових полігонів.

В настоящее время важное значение в народном хозяйстве Украины приобретают дистанционные методы исследования Земли, направленные на решение природоохранных, гидрологических, мелиоративных, сельскохозяйственных, гляциологических и др. задач.

Наибольшее количество исследований проведено в оптическом и ИК-диапазонах, однако в последнее время широкое распространение получили радиолокационные системы (РЛС), среди которых значительное место занимают радиолокаторы бокового обзора (РБО) как космического, так и самолетного базирования [1, 3, 6].

Такие системы обладают рядом преимуществ [2], практическая реализация которых в значительной мере связана с необходимостью определения абсолютных значений характеристик рассеяния зондируемых поверхностей. Так, для решения многих задач достаточно знать абсолютную величину удельной эффективной площади рассеяния  $\omega_0$  (УЭПР). Для ее измерения необходима абсолютная калибровка РЛС, которая должна учитывать аппаратурные нестабильности и влияние тропосферы на условия распространения радиоволн.

В настоящее время применяются два вида калибровки радиолокационных систем аэрокосмического базирования — внешняя и внутренняя. Внешняя калибровка проводится с использованием как пассивных (уголковые отражатели, линзы Люнеберга, плоские пластины и др.), так и активных отражателей (источников электромагнитного излучения). Кроме того, для проведения калибровки РБО нашли применение тестовые полигоны со стабильными во времени электродинамическими характеристиками (тропические леса, пустыни, широколистственные опадающие леса, тундра) [8].

При внутренней калибровке применяются, как правило, специальные калибраторы, подключаемые к радиолокатору или встроенные в его тракт. К первым можно отнести, например, измерители мощности и генераторы стандартных сигналов, контролирующие уровень излучения передатчика и чувствительность приемного устройства. Ко вторым относятся калибраторы, позволяющие определять потенциал радиолокатора непосредственно в процессе его работы.

Существенным ограничением при использовании внешней калибровки является необходимость регу-

лярных пролетов носителя над тестовыми полигонами, что приводит к определенным сложностям при работе с системой.

В данной статье основное внимание уделено внутреннему контролю энергетического потенциала радиолокационных систем аэрокосмического базирования, автоматическому учету его изменения, алгоритмам получения абсолютных значений УЭПР, основанных на таком контроле.

### ВНУТРЕННЯЯ КАЛИБРОВКА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Известно, что УЭПР рассеивающей поверхности определяется (пренебрегая влиянием атмосферы и потерями в системе) как:

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3 R^4 \rho_{\text{пр}}}{\lambda^2 \rho_{\text{пер}} G^2 S^0}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{пр}}$  — мощность принятого сигнала,  $\rho_{\text{пер}}$  — мощность излучения передатчика в импульсе,  $G$  — коэффициент усиления антенны,  $R$  — наклонная дальность до участка поверхности,  $\lambda$  — длина волны,  $S^0$  — проекция импульсного объема на поверхность.

Используя (1) и один из методов калибровки, можно получить абсолютные значения  $\sigma^0$ .

В радиолокационных системах космического базирования типа «Космос-1500», «Океан», «Сич-1», авиационных системах «Аналог», многоцелевой авиационной радиолокационной системе (МАРС) нами использован метод автоматической внутренней калибровки потенциала, который исключает необходимость постоянного контроля мощности излучения и измерения мощности принятого сигнала и чувствительности приемника.

Достигалась такая калибровка путем подачи ослабленного на известную величину и задержанного во времени СВЧ-импульса передатчика на вход приемного тракта. Задержка, необходимая для разделения видеоимпульса модулятора и СВЧ-импульса излучения, обеспечивалась акустической линией, выполненной на алюминиевом гранате, имеющей потери задержки 8 мкс.

Мощность калибровочного импульса на входе приемника равна

$$\rho_k = \frac{\rho_{\text{пер}}}{\gamma}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — сумарное ослабление задержанного (калибровочного) импульса передатчика, подаваемого на вход приемника.

Тогда из (1) и (2) при равенстве мощностей принятого и калибровочного сигналов (или равен-

стве их амплитуд на выходе системы обработки сигналов)

$$\sigma^0 = \frac{C}{\gamma}, \quad (3)$$

где

$$C = \frac{(4\pi)^3 R^4}{G^2 \lambda^2 \gamma},$$

— функция, зависящая от угла наблюдения ( дальности) и определяемая расчетным путем.

Как правило, в процессе работы аэрокосмических радиолокационных систем бокового обзора возникает необходимость управления коэффициентом усиления приемного тракта и системы обработки. Это связано, во-первых, с различной отражательной способностью подстилающих поверхностей (УЭПР может изменяться от -30 дБ для морской поверхности до +10 дБ для построек), а во-вторых — с наличием угловой зависимости УЭПР и изменением коэффициента усиления антенны в полосе обзора РБО. В этой связи соответствие уровня сигнала и динамического диапазона приемника устанавливается путем изменения общего коэффициента усиления приемника, а выравнивание яркости радиолокационного изображения (РЛИ) по дальности (строке) производится применением временной автоматической регулировки (ВАРУ) коэффициента усиления. При этом, если изменение общего коэффициента усиления при расчете УЭПР в соответствии с (2) не требует учета, то зависимость его от дальности необходимо фиксировать и вводить в расчет соответствующим образом. Структуру блока калибровки см. на рис. 1.

Задержанный импульс передатчика, пройдя все цепи приемника, блока обработки и линии передачи информации регистрируется совместно с радиолокационным изображением зондируемой поверхности в одних и тех же отсчетных единицах. После этого ко входу приемника через направленный

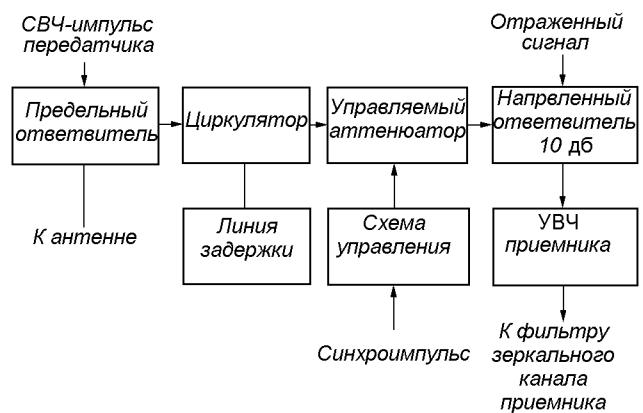


Рис. 1. Структурная схема тракта калибровки РБО

Рис. 2. Необработанное (а) и обработанное (б) РЛ-изображения РБО-3

ответвитель подключается генератор стандартных сигналов, на котором оператор устанавливает уровень сигнала, по амплитуде равный уровню калибровочного импульса. Вследствие наличия ВАРУ, регистратор фиксирует сигнал в виде опорной калибровочной кривой, повторяющей закон изменения коэффициента усиления по дальности.

Значения УЭПР зондируемой поверхности, уровни отражений от которой будут на соответствующих дальностях совпадать по амплитуде с амплитудой калибровочной кривой, рассчитываются в соответствии с (2).

В общем случае (при любой амплитуде отраженного сигнала) для расчета УЭПР при сравнении амплитуд используется семейство калибровочных кривых, получаемых в пределах динамического диапазона приемника. Кривые записываются путем ступенчатого изменения ослабления опорного калибровочного уровня генератора. Значение ослабления относительно опорного уровня учитывается при определении УЭПР в соответствии с (2) путем изменения величины  $\gamma$ .

Таким образом, точность определения абсолютных значений УЭПР зависит от точности расчета коэффициента  $C$  и точности измерения величины  $\gamma$ .

Ошибки измерения коэффициента усиления ан-

тенных, как правило, не превышают 0.5 дБ [7].

По нашим оценкам общая ошибка измерения значения коэффициента  $C$  составляет не более 0.5–1 дБ, а коэффициента  $\gamma$  — 0.5 дБ. Таким образом, суммарная погрешность измерения УЭПР поверхности при использовании метода внутренней калибровки составляет 1.5–2 дБ.

Для проверки этой цифры нами были использованы внешние эталонные отражатели с известной эффективной площадью рассеяния.

Для получения абсолютных значений УЭПР поверхности с высокой точностью в общем случае необходимо учитывать условия распространения на трассе летательный аппарат — Земля. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн можно использовать например результаты [4].

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ УЭПР ПРИ ВНУТРЕННЕЙ КАЛИБРОВКЕ РБО

Программный комплекс автоматического определения абсолютных значений УЭПР состоит из:

- программы вычисления калибровочных кривых и выбора опорной кривой;

- программы перевода значений исходного сигнала в значения УЭПР, приведенных к диапазону 256 уровней.

Первая программа осуществляет усреднение калибровочных сигналов, записанных в виде нескольких строк (10—30 строк), для устранения их флюктуаций, вызванных шумами приемника. Усреднение осуществляется путем медианной фильтрации скользящим окном. Размер окна выбран таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать время счета, а с другой — обеспечить достаточную гладкость калибровочных кривых.

Программа переводит исходный файл калибровочных кривых в массив данных. Каждый массив содержит 64 отсчета по наклонной дальности. Из сформированных калибровочных кривых выбирается опорная, по уровню соответствующая уровню калибровочного сигнала. Результаты записываются

в файл в форме с плавающей точкой.

По запуску программы происходит запрос о числе калибровочных ступеней и числе строк в ступеньке, обработка файла и формирование калибровочного массива в виде чисел с плавающей точкой. Сформированные кривые выводятся на экран. Одна из этих кривых высвечивается в мигающем режиме для выбора оператором в качестве опорной. Оператор имеет возможность вызывать изменение выбиряемой кривой для внесения коррекции систематической погрешности. После выбора опорной кривой программа осуществляет запись данных в файл с именем и заканчивает работу.

Программа калибровки РЛИ осуществляет перевод данных зарегистрированного сигнала в значения УЭПР путем сопоставления амплитуд сигнала с амплитудами калибровочных кривых и приводит его к диапазону 256 машинных уровней, что обес-

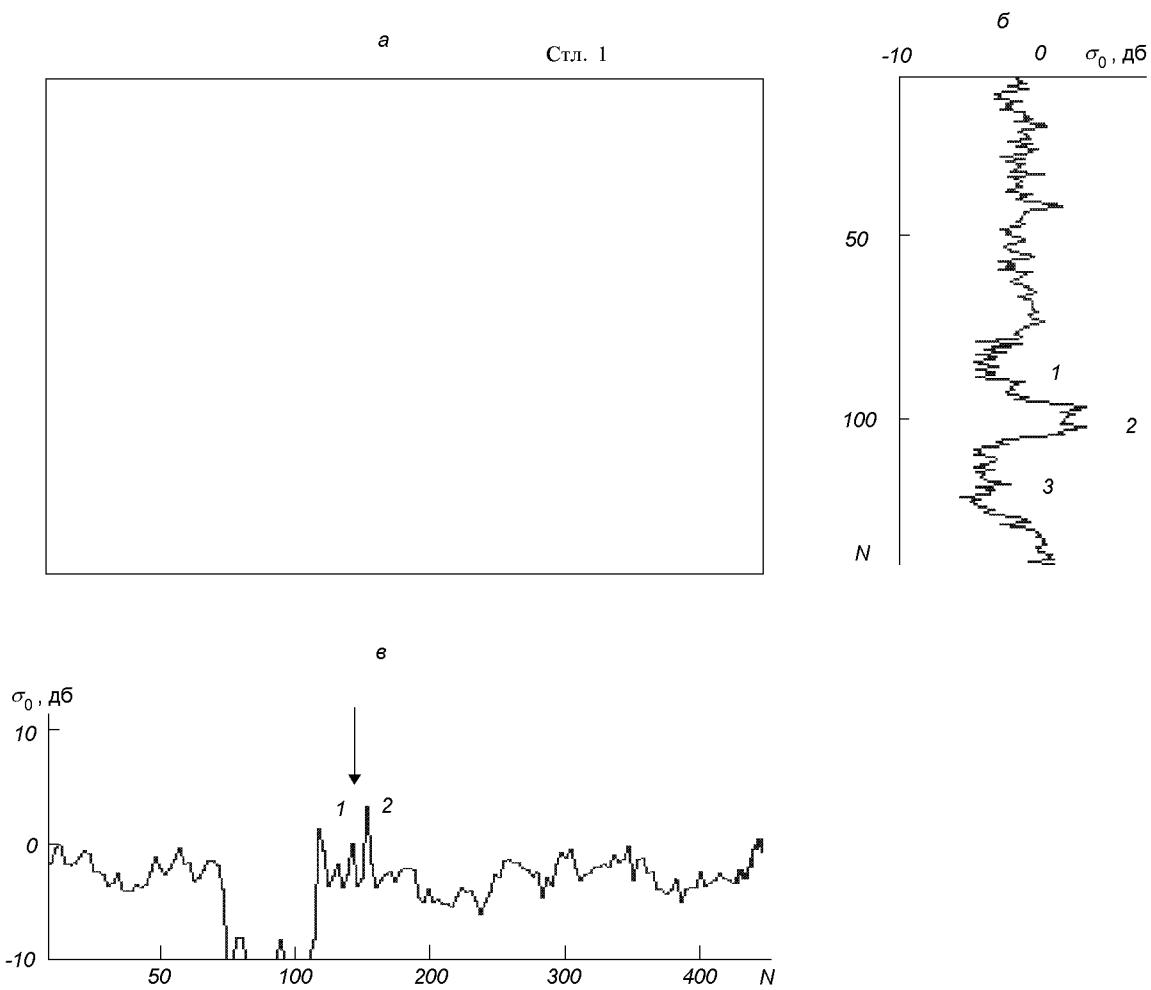


Рис. 3. Фрагмент радиолокационного изображения тестового полигона (a), строчные разрезы Стл. 1 (б), Стр. 1 (в)

печивает максимальную точность и формирует файл байтовых данных.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ УЭПР

Описанный выше алгоритм расчета УЭПР проходил апробацию в ЦРЗЗ НАНУ и НКАУ на материалах, полученных на тестовых полигонах с помощью радиолокационного комплекса МАРС, размещенного на самолете лаборатории ИЛ-18Д. В качестве основного калибровочного полигона использовались сельскохозяйственные поля в Харьковской области. Эталонными источниками переизлучения служили углковые отражатели и активные ответчики с известными ЭПР, расставленные через 100 м. Ответчики устанавливались на боронованном поле без растительного покрова, что позволило уверенно их наблюдать на фоне подстилающей поверхности.

Измерения ЭПР-эталонов проводились под различными углами места путем дискретного смещением трассы полета через каждые 5 километров, что позволило внести окончательные коррекции в алгоритм определения УЭПР и уточнить форму диаграммы направленности антенн.

На рис. 2, а показано исходное радиолокационное изображение, полученное в реальных условиях радиолокатором бокового обзора 3-см диапазона. Здесь представлен водоем, леса, сельскохозяйственные угодья. Ниже представлены изображения тех же участков после работы программы расчета в виде поля УЭПР.

Заметное повышение качества изображения объясняется полным программным устранением всех искажений исходного РЛИ. Каждому пикселу изображения соответствует абсолютное значение УЭПР. При определении описанным методом ЭПР эталонных углков, имеющих реальные значения  $\sigma_1 = 30 \text{ dB/m}^2$  и  $\sigma_2 = 27 \text{ dB/m}^2$ , была получена точность измерений не хуже 0,5 dB при хорошей повторяемости результатов во всем диапазоне углов наблюдения.

На рис. 3, а показан увеличенный фрагмент обработанного изображения (рис. 2, а), на котором представлены его строчные разрезы Стр. 1, Стл. 1 (рис. 3, б, в), приведенные к шкале абсолютных значений УЭПР. УЭПР вспаханных (1 и 3) и кукурузного (2) полей, согласуются с данными [5]. Стрелками обозначены также отклики от эталонных ответчиков 1 и 2, ЭПР которых нормирована на величину  $S^0$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод контроля энергетического потенциала радиолокаторов бокового обзора аэрокосмического базирования, проводимый с целью автоматического определения абсолютных значений УЭПР зондируемых поверхностей, базирующийся на использовании внутренней калибровки РЛС собственным импульсом излучения. В качестве инструмента исследований использовались радиолокационные изображения, полученные самолетным комплексом МАРС ЦРЗЗ НАНУ и НКАУ.

Проведенные натурные работы на тестовых полигонах показали высокую точность метода расчета УЭПР. Разработанный и опробованный алгоритм может быть использован в перспективных системах обработки радиолокационных сигналов РБО для получения данных об УЭПР зондируемых поверхностей в реальном масштабе времени. Представление РЛИ в виде поля УЭПР существенным образом снижает затраты на их тематическую обработку.

- Гавриленко А. С., Крыжановский В. В., Кулешов Ю. А. и др. Комплекс радиофизической аппаратуры для дистанционного зондирования природной среды. — Харьков, 1986.—39 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 321).
- Калмыков А. И., Тимченко А. И., Шербинин И. В. Возможности исследования подповерхностных эффектов с помощью радиолокационного зондирования. — Харьков, 1990.—25 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 90-13).
- Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Блинков А. Н. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли. — Харьков, 1990.—34 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 90-21).
- Кулемин Г. П., Курекин А. С. Влияние условий распространения на точность калибровки РЛС дистанционного зондирования // Радиолокационные системы летательных аппаратов. — Харьков: ХАИ, 1991.—С. 86—95.
- Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. Радио, 1980.—264 с.
- Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митникова, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990.—200 с.
- Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. — М: Связь, 1972.—352 с.
- Soode's Wordl Atlas.—14th ed. — Chicago: Rand McNally, 1974.—263 p.

#### AUTOMATIC INTERNAL CALIBRATION OF REMOTE SENSING SYSTEMS

S. E. Yatsevich, A. S. Kurekin, V. N. Uvarov, A. S. Levda

The paper deals with the automatic internal calibration of the side-looking radars for the remote sensing of the Earth aboard the «Cosmos-1500» and «Sich-1» satellites, as well as of the airborne multipurpose radar system MARS. Measurement errors are estimated, and some results of the radar surveying of testing sites are given.

УДК 621.396.11

# Цели, методы и алгоритмы локально-адаптивной устойчивой фильтрации радиолокационных изображений

**В. В. Лукин**

Харківський авіаційний інститут ім. М. Є. Жуковського, Харків

*Надійшла до редакції 15.12.97*

Розглядаються цілі, засоби та алгоритми завданостійкої локально-адаптивної фільтрації радіолокаційних зображень, спотворених мультиплікативними та імпульсними шумами, які дозволяють ефективно подавити шуми та усунути імпульси і водночас забезпечити збереження меж об'єктів та деталей. Властивості фільтрів проілюстровано для реальних даних дистанційного зондування.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные средства дистанционного зондирования поверхности Земли и океана с аэрокосмических носителей находят широкое применение для решения разнообразных задач благодаря более надежному функционированию в неблагоприятных погодных условиях по сравнению с системами оптического и инфракрасного диапазонов, непрерывно улучшаемому разрешению на основе создания новых методов и совершенствования технологии, обеспечению реальной возможности извлечения из радиоданных такой информации, которую не удается получить с помощью систем других диапазонов электромагнитных волн [5, 14, 36]. При этом все более заметной является тенденция к созданию многоканальных комплексов дистанционного зондирования, включающих подсистемы с различными длинами волн и поляризациями излучаемых и принимаемых сигналов или существенно отличающихся пространственной разрешающей способностью радиолокаторов, что позволяет в результате совместной обработки резко повысить надежность интерпретации радиолокационной информации, осуществлять одновременное измерение нескольких параметров объектов и их распознавание [14, 17, 36].

© В. В. Лукин, 1998

Вместе с тем качество первичных радиолокационных изображений, как правило, недостаточно высоко для непосредственной интерпретации. Это связано со следующими обстоятельствами. Во первых, даже на изображениях, сформированных радиолокаторами бокового обзора (РБО), есть значительный мультиплексный шум с относительной дисперсией 0.003—0.03. И если закон распределения мультиплексных помех для РБО-изображений близок к гауссовскому, то для изображений, формируемых радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), особенно одновзглядовыми, уровень мультиплексных помех (спекла) еще выше. При этом их распределение не является симметричным: это рэлеевское или экспоненциальное распределение для одновзглядовых РСА (в зависимости от используемой методики формирования выходного эффекта) или Г-распределение для многовзглядовых РСА-изображений [2].

Во-вторых, соседние отсчеты радиолокационных изображений во многих практических ситуациях характеризуются значительной коррелированностью мультиплексных помех [10, 39], что обусловлено непредельной дискретизацией данных и влиянием аппаратной функции. Это свойство может быть как позитивным, так и негативным. С

одной стороны, его учет позволяет отличать мало-размерные объекты от неинформативных выбросов (импульсных шумов) и сохранять такие объекты при последующей обработке. С другой стороны, оценки эффективности различных алгоритмов фильтрации, детектирования границ и т. д., полученные в рамках упрощенных моделей, предполагающих некоррелированность помех, оказываются мало применимыми для реальных данных.

В-третьих, импульсные помехи, возникающие, в частности, вследствие сбоев аппаратуры, ошибок кодирования-декодирования информации способны серьезно затруднить интерпретацию радиоизображений, ограничить круг применимых алгоритмов обработки данных [38].

Наконец, заметное негативное влияние на качество формируемых изображений могут оказывать и другие факторы: аддитивные шумы, характеристики направленности антенн РСА и РБО, нестабильности траектории движения носителя, неоптимальность алгоритма обработки сигналов, условия распространения колебаний в турбулентной атмосфере и осадках [7, 11, 13, 18]. Однако мы остановимся в первую очередь на анализе алгоритмов подавления мультиплекционных и импульсных помех, полагая эти факторы основными.

## ЦЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Фильтрация является важным этапом вторичной обработки данных дистанционного зондирования. Существует большое число работ [1, 2, 4, 6, 9, 13, 16, 22, 24, 25, 27, 31, 32, 39], посвященных обсуждению свойств разнообразных фильтров. Однако в последнее время появилось значительное число новых оригинальных эффективных алгоритмов фильтрации, например, КИХ (с конечной импульсной характеристикой) — медианные гибридные фильтры [12, 30], совсем не упоминавшиеся в обзорах [1, 2]; фильтры на основе максимальной апостериорной плотности вероятности [16], алгоритмы вторичной обработки изображений на основе гибкой логики и экспертных систем [23, 28, 34, 37]. Во-вторых, в большинстве работ помехи полагаются пространственно-некоррелированными, а доминирующим фактором считаются аддитивные шумы. Лишь относительно немногие публикации, специально ориентированные на анализ алгоритмов вторичной обработки радиоизображений, учитывают перечисленные выше эффекты [3, 24]. Поэтому к настоящему моменту времени не проведено тщательное сравнение эффективности различных

фильтров для ситуаций, типичных при обработке радиолокационных изображений. В-третьих, особо сложным случаем следует считать задачу фильтрации одновзглядовых РСА-изображений. Ряд фильтров, хорошо проявивших себя в менее сложных условиях (например, сигма-фильтр [2]) оказываются неприменимыми или приводят к нежелательным специфическим эффектам при обработке изображений, сформированных одновзглядовыми РСА. Поэтому вопрос о выборе типов и оптимизации характеристик фильтров, пригодных для практических приложений, по-прежнему остаётся актуальным.

Ограничивают выбор и применение известных фильтров при обработке радиоизображений противоречивые требования к их основным свойствам. Так, желательно одновременно достичь эффективного подавления мультиплекционных помех на однородных участках, надежно устраниТЬ импульсные шумы, сохранить малоразмерные детали и границы, обеспечить быстродействие и простоту реализации, сохранить средний уровень значений радиоизображений для однородных участков одновременно [22, 27]. Опыт показывает, что такой компромисс, как правило, удается обеспечить на основе нелинейных локально-адаптивных алгоритмов [3, 6, 22, 24, 25, 27], включающих пространственные подструктуры (по крайней мере при обработке локально-активных участков [12, 25, 30]) и учитывающих значение изображения в центральном элементе скользящего окна с большим весом, чем остальные [3, 12, 24, 30]. Действительно, поскольку изображения являются пространственно нестационарными процессами и для анализа эффективности их обработки сложно использовать единственный критерий, то применение локально-адаптивного подхода (*data-dependent*) позволяет реализовать преимущества различных фильтров или алгоритмов в зависимости от результатов предварительного распознавания фрагмента изображения для текущего положения скользящего окна. В простейших случаях распознавание проводится с целью выделить локально-пассивные фрагменты (однородные участки изображений, иногда с небольшим количеством выбросов) и локально-активные области (окрестности границ, мелких деталей, иногда выбросов). Возможно и распознавание большего числа вариантов [28, 34, 37].

Теми же причинами обусловлен и тот факт, что нелинейные алгоритмы фильтрации, как правило, обеспечивают лучшие результаты (сохранение границ и мелких деталей, робастность по отношению к выбросам), чем линейные. Неплохо проявили себя и фильтры, сочетающие линейную и нелиней-

ную обработку [3, 12, 30]. Наконец, анализ способности различных алгоритмов сохранять мелкие детали и границы при одновременном устраниении выбросов [24, 31] показывает, что для этого необходимо использовать фильтры, с большим весом принимающие во внимание значение центрального пикселя скользящего окна и ближайших к нему отсчетов (с различной пространственной ориентацией), но при этом характеризуемые явной нелинейностью свойств. Такими алгоритмами являются в той или иной степени КИХ-гибридные медианные фильтры [12, 30], медианный фильтр с взвешенным центральным значением [15, 35], модифицированный сигма-фильтр [29]. Фильтры Ли и Фроста [3, 9] также частично основаны на аналогичных идеях, но они не являются робастными и нуждаются в модификации для обеспечения приемлемой степени устойчивости к воздействию импульсных помех.

Требования обеспечить эффективное подавление мультиплекативных помех при сохранении среднего уровня на однородных участках обусловлено решаемыми при последующей обработке изображений задачами оценки эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) объектов, по которой затем измеряются их био- и геофизические характеристики с использованием моделей отражаемых сигналов. Сохранение границ и малоразмерных объектов важно для многих приложений — сегментации, обнаружения и локализации объектов, взаимной привязки и совмещения изображений и т. д. [24, 32].

Высокое быстродействие алгоритмов фильтрации рассматриваемого класса обеспечивается за счет комплексного использования следующих методик и алгоритмов: представления исходных и выходных данных в виде массивов целых, чаще байтовых чисел; реализации быстрых алгоритмов сортировки данных и рекурсивного вычисления параметров, организации конвейерной обработки данных, применения табличного умножения-деления (look-up Tables) [29, 31], пренебрежения ошибками округления и квантования.

Ниже будем рассматривать локально-адаптивные фильтры, ориентированные на обработку радиолокационных изображений в предположении, что основными факторами, определяющими их первичное качество, являются интенсивный мультиплекативный шум с заметной пространственной корреляцией двух-трех соседних отсчетов по строке и столбцу и импульсные помехи со сравнительно невысокой вероятностью их появления  $P_{\text{ап}}$ , не более нескольких сотых.

## ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Принцип функционирования локально-адаптивных алгоритмов фильтрации уже кратко описан выше, однако реализации подхода могут быть существенно различными. Пожалуй, впервые попытка классифицировать локально-адаптивные фильтры предпринята в работе [35], где предложено рассматривать случаи мягкого изменения (переключения) параметров фильтров (soft-switching) [19, 24] и жесткого (дискретного) перехода от одного алгоритма (типа и/или параметров) к другому (hard-switching) [3, 25]. Последние можно также назвать пороговыми локально-адаптивными фильтрами, поскольку решение о переходе от одного алгоритма к другому принимается на основании сравнения одного или нескольких параметров адаптации с одним или несколькими порогами. Возможны гибридные варианты [28, 37], а также последовательное использование локально-адаптивных и нелинейных алгоритмов [13, 26].

В качестве параметров адаптации возможно использование различных статистических характеристик (величин), оцениваемых для каждой текущей позиции центрального элемента скользящего окна, т. е. для выборок данных сравнительно малой размерности (10—30 независимых значений). Наиболее часто в качестве параметра адаптации используется локальная дисперсия, в случае превалирующего влияния мультиплекативных помех нормированная на квадрат локального среднего или медианного значения [3, 27]. Недостатком этого параметра адаптации является тот факт, что он чувствителен к импульсным помехам, что вынуждает многих авторов дополнительно к локальной дисперсии использовать детекторы импульсов [3, 31]. В работе [21] предложено сравнивать между собой локальные средние и медиану, однако и в этом случае наличие в скользящем окне импульсов и границ или малоразмерных объектов практически не «распознается».

В ряде работ [3, 6, 22, 24, 25, 27] предложены и рассмотрены и другие параметры адаптации. В частности, упомянутый Бовиком и Рестрепо [33] квазиrang  $Q_{ij}$  (разность между значениями  $p$ -й и  $q$ -й порядковых статистик выборки, сформированной из элементов изображения в скользящем окне, центр которого находится в  $ij$ -м пикселе) может быть успешно использован в качестве параметра адаптации, что показано в наших работах [3, 22, 25]. Специфика этого параметра заключается в том, что он обладает определенной устойчивостью по отношению к импульсным помехам, поэтому

при его использовании удается достаточно надежно идентифицировать однородный участок изображения, даже при наличии небольшого числа выбросов, и области, соответствующие границам и малоразмерным объектам.

Еще одним параметром адаптации может служить число отсчетов выборки  $N_o$ , принадлежащих некоторой окрестности (например,  $2\sigma_\mu$ -окрестности, где  $\sigma_\mu$  — СКО мультиплекативных помех) значения изображения  $I_{ij}$  в центральном пикселе скользящего окна [29]. Если при этом одновременно анализируется положение  $I_{ij}$  в ранжированной выборке, то также имеется возможность достаточно надежно «распознать» ситуации наличия «выбросов» и однородные участки или окрестности границ и малоразмерных объектов. Более подробно остановимся на этом ниже при анализе предложенной модификации сигма-фильтра.

Все перечисленные выше параметры адаптации так или иначе должны учитывать априорную информацию о свойствах изображений, в частности, значение  $\sigma_\mu$  мультиплекативных помех для РБО. В работе [3] нами введен так называемый  $Z$ -параметр для случая локально-адаптивной фильтрации одномерных процессов, а в [24, 27] — и для обработки изображений.

Его основным отличием является работоспособность и при отсутствии достоверной априорной информации об уровне мультиплекативных помех, поскольку  $Z$ -параметр позволяет оценивать соотношение между относительной степенью влияния флюктуационной составляющей помех и динамической ошибкой предварительного фильтра для каждого текущего положения скользящего окна.  $Z$ -параметр, сравниваемый с порогом, способен индицировать однородные участки ( $Z_{ij}$  меньше порога) и области с возможным наличием выбросов, малоразмерных объектов и окрестности границ. Причем превышающие порог значения  $Z_{ij}$  наблюдаются с

двух сторон от реальной границы двух площадных объектов или непосредственно в пикселях, соответствующих деталям, выбросам и на небольшой окрестности.

В любом случае перед выработкой рекомендаций, касающихся выбора типа фильтров для локально-пассивных и локально-активных участков, определения размеров скользящего окна и приемлемого параметра адаптации, необходимо учитывать сведения о принципе функционирования системы формирования изображения (РБО или РСА), уровне помех (мультиплекативных, аддитивных, импульсных), их статистических и спектрально-корреляционных характеристиках, среднем уровне контрастов и геометрических свойствах (размере, выраженном в числе пикселов, пространственной ориентации) малоразмерных объектов, приоритете требований к алгоритмам фильтрации. При этом для локально-пассивных участков целесообразно использовать нелинейные устойчивые алгоритмы обработки (фильтр Вилкоксона,  $\alpha$ -усеченные или суммарно-ранговые фильтры [3, 22, 24, 25, 27] с относительно большой апертурой скользящего окна, содержащей 15—30 элементов разрешения, т. е. обычно 25—80 пикселов, квадратной или прямоугольной формы). Для обработки локально-активных участков применимы КИХ-медианные гибридные, сигма и модифицированный сигма, медианный со взвешиванием центрального элемента и другие фильтры, сохраняющие детали и границы и одновременно обладающие способностью устранять выбросы [12, 15, 28, 30, 35]. Размер апертуры скользящего окна для них может быть немного меньше, например, квадраты  $5 \times 5$  или  $3 \times 3$  пикселов, возможно также использование одной крестообразной или нескольких субапертур при решении частных задач. Варьирование порога, с которым сравнивают значение параметра адаптации, также позволяет достичь приемлемого компромисса при изменении приоритета требований к фильтрации или свойств обрабатываемых радиоизображений.

Таким образом, существует большое число разнообразных алгоритмов локально-адаптивной фильтрации, поскольку в каждом из блоков соответствующих схем (рис. 1) могут быть реализованы разные методики обработки данных. В связи с этим в рамках одной статьи весьма сложно привести все возможные варианты, хотя попытки частичной систематизации и предприняты в работах [8, 24, 28]. К настоящему моменту не разработана единая методика всестороннего анализа свойств и характеристик локально-адаптивных фильтров, при этом многие исследователи пользуются набором частных количественных критериев или качественным опи-

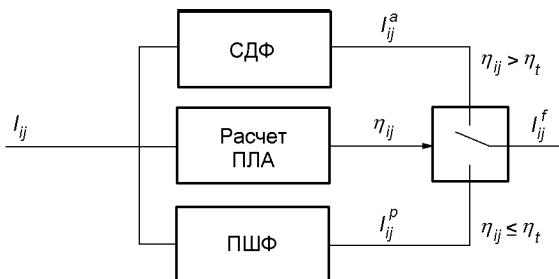


Рис. 1. Блок-схема локально-адаптивного фильтра

санием [3, 8, 24, 31]. В качестве таких критериев обычно используют эффективность подавления флюктуационных помех на однородном участке  $\delta_n$ , характеризуемую соотношением дисперсий шумов после и до фильтрации, аналогичные критерии  $\delta_e$  и  $\delta_d$  для окрестностей границ площадных объектов и деталей соответственно, а также  $\varepsilon$  — отношение числа выбросов, которые могут быть устраниены в результате фильтрации, к общему числу пикселов в апертуре скользящего окна. Быстродействие обычно описывают временными затратами при реализации алгоритма фильтрации на языке Фортран-77 на Workstation Sun [31] при обработке изображений стандартных размеров ( $256 \times 256$ ). Здесь необходимо отметить, что последние два параметра ( $\varepsilon$  и быстродействие) для локально-адаптивных фильтров трудно характеризовать, поскольку они зависят от вида тестового изображения, свойств импульсных помех и конкретной реализации алгоритма фильтрации.

Приведем в данной работе описание и анализ свойств алгоритмов вторичной обработки радиоизображений, предложенных нами и представляющих наибольшую эффективность при фильтрации радиоданных, сформированных РБО и РСА. При этом представлены новые сведения о следующих алгоритмах: модифицированном сигма-фильтре [29], локально-адаптивном фильтре на основе двух порядковых статистик и  $Q$ -параметра [24, 25], последовательном использовании [13, 26] фильтра Ли [8] и КИХ-медианного гибридного фильтра (модификации 3LH+) [12, 30].

Обобщенную модель изображения запишем в виде

$$I_{ij} = \begin{cases} S_{ij} \mu_{ij} & \text{с вероятностью } 1 - P_{an}, \\ n_{ij}^{imp} & \text{с вероятностью } P_{an}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_{ij}$  —  $ij$ -й отсчет сигнальной составляющей с учетом сглаживающего действия функции неопределенности системы формирования изображения,  $\mu_{ij}$  — множитель, учитывающий воздействие пространственно-коррелированных мультиплекативных помех ( $\langle \mu_{ij} \rangle = 1$ ),  $n_{ij}^{imp}$  — значение изображения в отсчете, искаженное импульсным шумом. Его модели могут быть различны в зависимости от конкретных условий функционирования СФИ, но наиболее неблагоприятным случаем обычно является «salt-and-pepper» шум, когда значения  $n_{ij}^{imp}$  с одинаковой или различной вероятностями принимают максимальное и минимальное значения в диапазоне численного представления изображений (часто 255 и 0 при байтовых массивах данных).

## НОВЫЕ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ И ИЛЛЮСТРАЦИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Напомним, что обычный сигма-фильтр [20] реализует для каждого положения скользящего окна невзвешенное усреднение значений отсчетов изображения, принадлежащих  $2\sigma$ -окрестности значения центрального элемента

$$I_{ij}^s = \frac{1}{N_s} \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L I_{i-k, j-l} \delta_{kl}, \quad N_s = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L \delta_{kl}, \quad (2)$$

где

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{i-k, j-l} \in [I_{ij}(1 - 2\sigma_\mu); I_{ij}(1 + 2\sigma_\mu)], \\ 0, & \text{если } I_{i-k, j-l} \notin [I_{ij}(1 - 2\sigma_\mu); I_{ij}(1 + 2\sigma_\mu)]. \end{cases} \quad (3)$$

Этот эвристический алгоритм хорошо сохраняет границы и малоразмерные объекты, он ориентирован на обработку РБО изображений с нормальным (гауссовским) распределением мультиплекативных помех, имеющих относительно малую дисперсию  $\sigma_\mu^2 \leq 0.01$  при отсутствии выбросов. Однако он имеет и ряд существенных недостатков, недостаточно полно освещенных в литературе. Во-первых, это недостаточно высокая эффективность подавления мультиплекативных помех, причем отличие параметра  $\delta_n$  от потенциально достижимого возрастает по мере увеличения размеров апертуры скользящего окна  $N = (2K + 1)(2L + 1)$ . Так, для пространственно-некоррелированных помех имеем  $\delta_n = 0.215$  при  $N = 5 \times 5$  ( $\sigma_\mu^2 = 0.03$ ,  $\delta_{min} = 0.04$ ) и  $\delta_n = 0.182$  при  $N = 7 \times 7$  ( $\sigma_\mu^2 = 0.03$ ,  $\delta_{min} = 0.02$ ), т. е. увеличение размера скользящего окна почти в два раза (по числу пикселов) приводит к снижению дисперсии остаточных флюктуаций лишь на 15 %. Во-вторых, при обработке однородных участков изображений сигма-фильтром наблюдается смещенность оценки среднего уровня, возрастающая по мере увеличения  $\sigma_\mu^2$  и достигающая величины порядка 1 дБ при  $\sigma_\mu^2 = 0.1$ . Этот эффект характерен только в случае превалирующего влияния мультиплекативных помех; он обусловлен тем, что ширина области, в которой производится усреднение, зависит от  $I_{ij}$  и, соответственно, от  $\mu_{ij}$ . Поэтому для  $\mu_{ij} > 1$  ширина области усреднения оказывается больше, чем для  $\mu_{ij} < 1$ , вследствие чего и проявляется результирующая смещенность оценки среднего уровня на однородном участке.

Еще один недостаток обычного сигма-фильтра заключается в его неспособности устранять выбросы. Алгоритм «не учитывает» выбросы, расположенные не в центральном пикселе скользящего

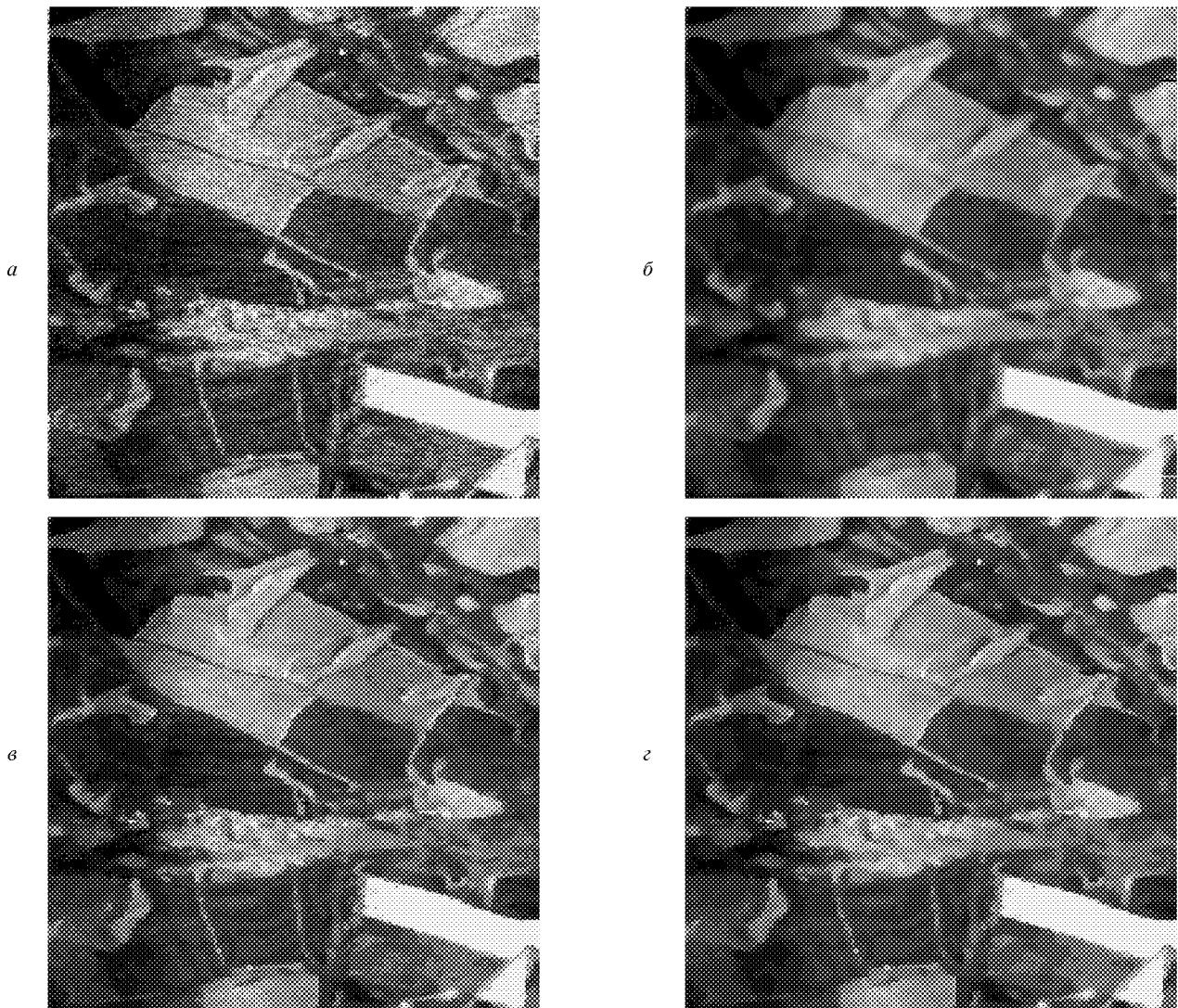


Рис. 2. *a* — исходное изображение, сформированное РБО ( $\lambda = 8$  мм); *б* — результат обработки изображения медианным фильтром  $5 \times 5$ ; *в* — обычным сигма-фильтром  $5 \times 5$ ; *г* — модифицированным сигма-фильтром  $5 \times 5$

окна, но в большинстве случаев оставляет без изменений значения пикселов, искаженных импульсным шумом. Поэтому необходимо как-то «дектировать» эти выбросы и обеспечить возможность их устранения, повышения эффективности и робастности сигма-фильтра.

Пути повышения эффективности и обеспечения робастности сигма-фильтра предложены нами в работе [29]; соответствующий алгоритм назван модифицированным сигма-фильтром (МСФ).

Фактически предложенный вариант является нелинейным локально-адаптивным фильтром, основанным на анализе нескольких параметров адаптации:  $N_S$ ,  $N_G$  и  $N_L$ , а также положения централь-

ного элемента изображения  $r_{ij}$  в ранжированной выборке значений отсчетов, принадлежащих текущему положению скользящего окна. Здесь  $N_G$  и  $N_L$  — числа значений отсчетов  $2\sigma$ -окрестности, которые соответственно больше и меньше  $I_{ij}$ . Если  $N_S$  мало (меньше 0.1—0.15N), то вероятно, что центральный пиксел соответствует выбросу, малоразмерному объекту или границе. Если при этом  $r_{ij}$  приближается к единице или N ( $r_{ij} \notin [0.1N; 0.9N]$ ), то высока вероятность именно первых двух ситуаций. Тогда необходимо использовать алгоритм фильтрации, способный сохранить детали, обладающие свойствами компактности и связности расположения соответствующих пикселов, или устраниТЬ

выброс или несколько выбросов. Решить такую задачу позволяют КИХ-медианные гибридные фильтры, которые и рекомендованы к применению в случае, если  $N_s$  меньше определенного порога ( $0.1—0.15N$ ). Наилучшим алгоритмом в этом случае является 3LN+ вариант КИХ-медианного гибридного фильтра [12].

В противном случае (при  $N_s > 0.1—0.15N$  центральный пиксель скорее всего принадлежит однородному участку или окрестности границы площадных объектов. Для этого случая целесообразно использовать следующий алгоритм.

- Если  $N_G \geq N_L$ , то в пределах  $2\sigma$ -окрестности находят минимальное значение изображения  $I_{ij}^{\min} = \min\{I_{i+k,j+l} | \delta_{kl} = 1\}$ , формируют новую окрестность  $[I_{ij}^{\min}; I_{ij}^{\min}(1 - 2\sigma_\mu)/(1 + 2\sigma_\mu)]$  и для нее проводят усреднение отсчетов выборки с учетом новых значений, попавших в эту окрестность, и нового  $N'_s$ .

- Если  $N_G < N_L$ , то аналогичным образом находят максимальное значение

$$I_{ij}^{\max} = \max\{I_{i+k,j+l} | \delta_{kl} = 1\},$$

формируют новую окрестность

$$[I_{ij}^{\max}(1 - 2\sigma_\mu)/(1 + 2\sigma_\mu); I_{ij}^{\max}]$$

и проводят усреднение значений отсчетов, ей принаследлежащих.

Такая методика позволяет значительно расширить окрестности для пикселов, имеющих  $r_{ij} \in [0.1N; 0.9N]$  и добиться в результате значительно более высокой (в 2.5—3.6 раза по сравнению со стандартным сигма-фильтром) эффективности подавления мультиплекативных помех на однородных участках при примерно тех же значениях  $\delta_e$ , характеризующих сохранение границ. В несколько раз уменьшается и смешенность оценок среднего уровня для однородных участков. Полученные для тестовых и реальных данных оценки  $\delta_n$  лишь в 1.6—2.8 раза (соответственно для апертур  $5\times 5$  и  $7\times 7$  пикселов) выше, чем эти значения для линейного (усредняющего) фильтра с таким же размером апертуры  $N$ , т. е. не хуже (для апертуры  $5\times 5$  пикселов), чем для медианного фильтра. При этом предложенный модифицированный сигма-фильтр (МСФ) обладает гораздо лучшей способностью сохранять границы площадных объектов (не обрезает углы) и мелкие детали по сравнению с медианным фильтром, причем по мере увеличения размера скользящего окна для сигма-фильтра это свойство ухудшается медленнее, чем для многих других алгоритмов.

Проиллюстрируем это на конкретных примерах.

На рис. 2, *a* приведено исходное изображение, сформированное РБО с рабочей длиной волны 8 мм. Очевидно, оно содержит однородные участки, соответствующие сельскохозяйственным угодьям и лесным массивам, и малоразмерные (в том числе протяженные) объекты — лесополосы, дороги. Есть также участки с явно выраженной текстурой — населенный пункт. На рис. 2, *b* показано то же изображение, обработанное медианным фильтром с размером апертуры скользящего окна  $5\times 5$  пикселов. Некоторые информативные детали были «восприняты» им как импульсные помехи и устраниены. На рис. 2, *c*, *g* приведены изображения, полученные при использовании обычного и модифицированного сигма-фильтров соответственно ( $N = 5\times 5$ ,  $\sigma_\mu^2 = 0.006$ ). В обоих случаях наблюдается гораздо лучшее сохранение мелких деталей и границ, но МСФ обеспечивает заметно более эффективное подавление мультиплекативных помех на однородных участках, что было доказано и для тестовых моделей. Следовательно, для РБО изображений МСФ обладает необходимым компромиссом свойств, что позволяет рекомендовать его к широкому практическому использованию в соответствующих системах.

Перейдем к рассмотрению других алгоритмов, основанных на использовании принципа локальной адаптации,  $Q$ -параметра и порядковых статистик. В этом плане возникает несколько вопросов.

- Сколько и какие порядковые статистики необходимо выбирать для обеспечения необходимой эффективности подавления мультиплекативных помех и одновременного сохранения среднего уровня значений изображения на однородном участке?

- Как вычислять квазиранг или его аналоги, чтобы добиться высокой вероятности правильного обнаружения границ и мелких деталей и при этом обеспечить приемлемую робастность этого параметра по отношению к выбросам?

- Как реализовать хорошее сохранение границ и малоразмерных объектов при использовании ограниченного числа вычисляемых порядковых статистик, достигая за счет этого высокого быстродействия обработки радиоизмерений.

Эти аспекты достаточно подробно обсуждены в наших работах [22, 24, 25, 28]. Систематизируя эти данные, приведем основные выводы.

- С точки зрения обеспечения робастности по отношению к импульсным помехам как при реализации сглаживания на однородных участках, так и при вычислении квазиранга и сохранении границ и деталей необходимо ориентироваться на использование порядковых статистик с номерами не меньше  $0.15—0.20N$  и не больше  $0.80—0.85N$ .

2. Среди порядковых статистик, принадлежащих этому интервалу, был проведен поиск значений номеров двух (а для некоторых ситуаций также трех и четырех) порядковых статистик, среднее арифметическое или среднее геометрическое которых позволяет достичь минимальных значений  $\delta_n$  при сохранении среднего уровня. Показано, что для нормального закона распределения мультиплекативных помех желаемый эффект достигается при номерах порядковых статистик  $p = 0.25N$ ,  $q = 0.75N$  (рассматривался только случай расчета среднего арифметического  $I_{ij}^f = (I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(q)})/2$ ) при пространственной некоррелированности отсчетов и  $p \approx 0.25N$ ,  $q \approx 0.75N$  при коррелированности значений изображений в соседних пикселях [24]. Полученные значения  $\delta_n$  в первом случае лишь на 20 % больше, чем для линейного фильтра с той же апертурой, а при коррелированности соседних отсчетов различие еще меньше, причем результаты сравнимы с  $\delta_n$  для  $\alpha$ -урезанного фильтра при  $\alpha = 0.15-0.20$ . Если же закон распределения является рэлеевским или экспоненциальным, то и значения номеров оптимальных порядковых статистик оказываются несимметричными относительно медианы, имеющей номер  $(N + 1)/2$ . Так, для рэлеевского распределения при некоррелированности мультиплекативных помех имеем  $p = 0.36N$ ,  $q = 0.78N$ , а при коррелированности —  $p \approx 0.25N$ ,  $q \approx 0.78N$ . В первом случае  $\delta_n = 1.25\delta_{nL}$ , во втором  $\delta_n \approx 1.1\delta_{nL}$ , где  $\delta_{nL}$  — эффективность подавления мультиплекативных помех линейным фильтром с апертурой  $N$  пикселов. Для экспоненциального закона распределения наилучшие результаты при использовании среднеарифметического двух порядковых статистик дают  $p = 0.48N$ ,  $q = 0.78N$  при некоррелированных мультиплекативных помехах ( $\delta_n \approx 1.3\delta_{nL}$ ) и  $p \approx 0.47N$ ,  $q \approx 0.79N$  при коррелированности соседних отсчетов ( $\delta_n \approx 1.16\delta_{nL}$ ). При этом использование гомоморфной обработки (а вычисление среднего арифметического соответствует гомоморфной обработке типа логарифма, усреднению и обратному гомоморфному преобразованию) не приводят к улучшению  $\delta_n$  при том же числе учитываемых порядковых статистик по сравнению с обычным усреднением. Небольшой выигрыш (снижение) значений  $\delta_n$  достичим при взвешенном усреднении порядковых статистик, но это несколько усложняет реализацию алгоритма и снижает быстродействие.

3. Возможны два варианта вычисления квазиранга или его аналогов [28]:

$$Q_{ij} = [I_{ij}^{(q)} - I_{ij}^{(p)}] / [I_{ij}^{(q)} + I_{ij}^{(p)}] \quad (4)$$

и

$$Q_{ij} = I_{ij}^{(q)} / I_{ij}^{(p)}. \quad (5)$$

Их свойства практически идентичны, вопрос состоит лишь в выборе порога.

Численный анализ и опыт показывают, что чувствительность этих параметров к перепадам интенсивности (границам) и малоразмерным объектам зависит от многих факторов: закона распределения помех, выбора порога, характерных контрастов объектов и размеров деталей. Для нормального закона распределения помех наилучшая чувствительность к границам имеет место при  $p \approx 0.2N$ ,  $q \approx 0.8N$ ; если детали имеют размеры не меньше  $0.2N$  пикселов, то этот вывод также справедлив. Для рэлеевского закона распределения с точки зрения чувствительности  $Q$ -параметра к границам и мелким деталям также целесообразно выбирать  $p \approx 0.3N$ ,  $q \approx 0.75N$ , аналогичные рекомендации справедливы и для экспоненциального закона распределения мультиплекативных помех. Следовательно, если для нормального и рэлеевского законов наблюдается практическое совпадение оптимальных значений порядковых статистик с точки зрения как эффективности подавления помех, так и чувствительности  $Q$ -параметра к границам и деталям, то для экспоненциального закона все же имеется заметное различие. Поэтому ниже предложены два локально-адаптивных алгоритма, описываемые единым выражением:

$$I_{ij}^f = \begin{cases} I_{ij}^{\text{pas}}, & Q_{ij} < Q_t, \\ I_{ij}^{\text{act}}, & Q_{ij} \geq Q_t, \end{cases} \quad (6)$$

где  $I_{ij}^{\text{pas}}$ ,  $I_{ij}^{\text{act}}$  и  $I_{ij}^f$  — выходные значения фильтров для пассивных участков, активных фрагментов и итоговое соответственно;  $Q_t$  — порог, выбираемый с учетом  $\sigma_\mu$ , номеров порядковых статистик в (4), (5), закона распределения помех, приоритета требований к алгоритмам фильтрации.

Для обеспечения простоты и высокого быстродействия алгоритмов (6) с учетом (4) или (5) положим, что используются лишь две или три порядковые статистики. Это позволяет, во-первых, осуществлять их расчет параллельно с помощью специализированных устройств или алгоритмов быстрой сортировки данных [24, 31]. Тогда  $I_{ij}^{\text{pas}}$  следует формировать в виде

$$I_{ij}^{\text{pas}} = (I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(q)})/2, \quad (7)$$

где  $p$  и  $q$  выбираются в зависимости от закона распределения, степени пространственной коррелированности отсчетов  $N$ , и размеров деталей, которые необходимо сохранить, в соответствии с рекомендациями, представленными выше, таким обра-



Рис. 3. Исходное изображение, сформированное РБО ( $\lambda = 3$  см) (а); результат обработки изображения суммарно-ранговым фильтром  $7 \times 7$ ,  $p = 10$ ,  $q = 40$  (б); локально-адаптивным алгоритмом  $7 \times 7$ , описываемым выражениями (4), (6), (7), (9) (в); результат дополнительной обработки КИХ-медианным гибридным фильтром  $5 \times 5$  изображения в (г)

зом, чтобы обеспечить приемлемый компромисс свойств локально-адаптивного фильтра. Отличие для случая экспоненциального распределения мультиплекативных помех состоит в том, что целесообразно выбирать  $p = 0.2N$ ,  $q \approx 0.82N$ .

Что касается методики расчета  $Q_{ij}$  и выбора порога, то в этом плане для нормального и рэлеевского законов распределения целесообразно использовать те же  $p$  и  $q$ , а для расчета  $I_{ij}^{act}$  применять один из двух алгоритмов:

$$I_{ij}^{act} = \begin{cases} I_{ij}^{(p)}, & \text{если } I_{ij} \leq (I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(q)})/2, \\ I_{ij}^{(q)}, & \text{если } I_{ij} > (I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(q)})/2, \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{ij}^{act} = \begin{cases} I_{ij}^{(p)}, & \text{если } I_{ij} \leq (3I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(q)})/4 = I_{ij}^{pas} - D_{ij}/4, \\ I_{ij}^{pas}, & \text{если } I_{ij} \in [I_{ij}^{pas} - D_{ij}/4; I_{ij}^{pas} + D_{ij}/4], \\ I_{ij}^{(q)}, & \text{если } I_{ij} > I_{ij}^{pas} + D_{ij}/4, \end{cases} \quad (9)$$

где  $D_{ij} = I_{ij}^{(q)} - I_{ij}^{(p)}$ . Очевидно, что при предварительно вычисленных значениях  $I_{ij}^{(q)}$  и  $I_{ij}^{(p)}$  выполнить операции (7), (8) и (9) очень легко. Алгоритм (8) следует применять, если желательно добиться подчеркивания границ объектов и мелких деталей, а алгоритм (9) — при стремлении обеспечить более эффективное подавление помех. Уменьшение порога  $Q_t$  в (6) приводит к улучшению способности локально-адаптивного фильтра сохранять детали и



Рис. 4.  $a$  — исходное изображение, сформированное РСА ( $\lambda = 23$  см);  $b$  — результат обработки изображения локально-адаптивным алгоритмом  $7 \times 7$ ,  $p = 17$ ,  $q = 37$ , описываемым выражениями (4), (6), (7), (9);  $c$  — фильтром Ли  $7 \times 7$ ;  $d$  — результат дополнительной обработки КИХ-медианным гибридным фильтром  $5 \times 5$  изображения  $c$

границы объектов за счет ухудшения эффективности подавления мультиплектических помех и некоторой потери устойчивости к выбросам.

При сильной зашумленности исходного изображения, характерной для одновзглядовых РСА (экспоненциальный закон распределения мультиплектических помех), можно использовать три порядковые статистики  $r < p < q$  и рассчитывать три значения параметров  $Q_{ij}$ :

$$\begin{aligned} Q_{ij}^t &= I_{ij}^{(q)} / I_{ij}^{(r)}, & Q_{ij}^p &= I_{ij}^{(q)} / I_{ij}^{(p)}, \\ Q_{ij}^n &= I_{ij}^{(p)} / I_{ij}^{(r)}, & r &= (N + 1)/2, \end{aligned} \quad (10)$$

и считать, что  $Q_{ij}$ , используемый в (6), больше порога, если по крайней мере два из параметров  $Q_{ij}^t$ ,  $Q_{ij}^p$ ,  $Q_{ij}^n$  больше соответствующих  $Q_{ij}^t$ ,  $Q_{ij}^p$ ,  $Q_{ij}^n$ . Алгоритм вычисления  $I_{ij}^{\text{act}}$  тогда можно представить в виде

$$I_{ij}^{\text{act}} = \begin{cases} I_{ij}^{(p)}, & \text{если } I_{ij} < (I_{ij}^{(p)} + I_{ij}^{(r)})/2 \cup Q_{ij}^n > Q_t^n, \\ I_{ij}^{(q)}, & \text{если } I_{ij} > (I_{ij}^{(r)} + I_{ij}^{(q)})/2 \cup Q_{ij}^p > Q_t^p, \\ 1.4I_{ij}^{(r)}, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (11)$$

Такая процедура стремится для локально-активных участков «распознать» окрестности границ и малоразмерные объекты с положительными и отри-

циательными контрастами относительно окружающего фона и подчеркнуть их.

Продемонстрируем эффективность и свойства предложенных алгоритмов для реальных данных. На рис. 3, а приведено исходное РБО-изображение, сформированное с самолетного носителя системой с рабочей длиной волны 3 см. Зондируемый участок земной поверхности почти тот же, что и на рис. 2. На изображении имеются импульсные помехи, расположенные компактно, но не более трех искаженных пикселов рядом. Если использовать только суммарно-ранговый фильтр (7) ( $p = 10$ ,  $q = 40$ ,  $N = 7 \times 7$  пикселов), то одновременно с достижением хорошего подавления мультиплексивных помех на однородных участках и устранением импульсного шума наблюдается сильное размытие границ площадных объектов и мелких деталей (рис. 3, б). Использование же локально-адаптивного фильтра, описываемого выражениями (4), (6), (7), (9), приводит к хорошему сохранению границ и мелких деталей (рис. 3, в). Специфика полученного изображения также заключается в том, что на однородных участках и в окрестностях границ наблюдается «мелкозернистость» остаточного компонента флюктуационных помех. Поэтому существует возможность дополнительного снижения дисперсии остаточных флюктуационных помех, немного уменьшить изрезанность границ и частично устранив оставшиеся выбросы за счет последовательного применения КИХ-медианного гибридного фильтра к выходному изображению описанного выше локально-адаптивного алгоритма. Результат использования такой процедуры приведен на рис. 3, г.

Для РСА-изображения, имеющего рэлеевский закон распределения мультиплексивных помех и характеризуемого коррелированностью их значений для соседних отсчетов (рис. 4, а) был также использован локально-адаптивный фильтр, описываемый выражениями (4), (6)–(8). Результат обработки показан на рис. 4, б ( $N = 7 \times 7$ ,  $p = 17$ ,  $q = 37$ ). Для сравнения на рис. 4, в показано выходное изображение после фильтра Ли [2, 3]. Эффективность подавления помех на однородных участках примерно одинаковая, но предложенный алгоритм обеспечивает более четкое подчеркивание границ и деталей, при этом в отличие от фильтра Ли локально-адаптивный алгоритм (4), (6)–(8) обладает робастными свойствами. Наконец, на рис. 4, г показан результат дополнительной обработки изображения, приведенного на рис. 4, в, КИХ-медианным гибридным фильтром ( $N = 5 \times 5$ ). Очевидно, что при этом удается избавиться от части недостатков: дополнительно подавить остаточные мультиплексивные помехи как на однородных участках, так и в окрестности границ и малоразмерных объектов. Достижимые при этом значения  $\delta_h$  оказываются почти такими же, как и для линейного усредняющего фильтра с той же апертурой, что и у фильтра Ли или локально-адаптивного алгоритма.

**Выводы**

Таким образом, показано, что локально-адаптивный подход к фильтрации радиолокационных изображений является эффективным средством вторичной обработки пространственно-нестационарных информационных сигналов, позволяя при приемлемых вычислительных затратах достичь желаемого компромисса между надежностью устранения выбросов, степенью подавления мультиплексивных помех при различных законах их распределения и их пространственных корреляционных свойствах, сохранением границ и мелких деталей. Обсуждены особенности применения предложенных алгоритмов для реальных данных, приведены количественные данные, характеризующие свойства рассмотренных фильтров с различных точек зрения и подтверждающие их эффективность.

Автор выражает признательность профессору Калмыкову А. И. (ИРЭ АН Украины) за предоставленные реальные данные и благодарит соавторов совместных работ, указанных в списке литературы, за помощь и полезное обсуждение результатов исследований.

1. Ахметьянов В. Р., Пасмурев А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубеж. радиоэлектроника.—1987.—№ 1.—С. 70.
2. Белокуров А. А. Методы сглаживания спектр-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубеж. радиоэлектроника.—1990.—№ 6.—С. 26.
3. Зеленский А. А., Кулемин Г. П., Лукин В. В., Мельник В. П. Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений. — Харьков, 1993.—39 с. (Препринт / ИРЭ НАН Украины; № 93-8).
4. Зеленский А. А., Лукин В. В., Мельник В. П. Адаптивная фильтрация изображений миллиметрового диапазона волн // Использование радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: Сб. науч. тр. — Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1993.—С. 28—32.
5. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Блинков А. И. и др. Многоцелевая система радиолокационного зондирования природной среды Земли из космоса. Обоснование, выбор параметров и предложения по созданию. — М.: ВИНТИ, 1988.—99 с.
6. Ali S. M., Burge R. E. New automatic techniques for smoothing and segmenting SAR images // Signal Proc.—1988.—14.—P. 335—346.
7. Anukhin I. P., Lukin V. V., Zelensky A. A. Fast data weighting algorithms for non-focused SAR image forming // Proc. Inter.

- Symp. AeroSense'95, SPIE, Orlando, Florida, USA, April 1995.—2487.—P. 404—411.
8. Campbell T. G. Design and implementation of image filters: Thesis for the Degree of Doctor of Technology. — Tampere, 1992.—138 p.
  9. Durand J. M., Gimonet B. J., Perbos J. R. Speckle in SAR images: an evaluation of filtering techniques // Adv. Space Res.—1987.—N 11.—P. 301—304.
  10. Goodman G. W. Some fundamental properties of speckle // J. Opt. Soc. Amer.—1976.—66, N 11.—P. 1145—1149.
  11. Gorbunenko B. F., Totsky A. V. Statistical investigations of the synthetic aperture images // Int. J. Remote Sensing, Sept. 1994.—15, N 9.—P. 1761—1774.
  12. Heinonen P., Neuvoo Y. FIR-median hybrid filters // IEEE Trans.—1987.—ASSP-35, N 6.—P. 832—838.
  13. Kalmykov A. I., Lukin V. V., Zelensky A. A. Some techniques and algorithms of SAR image enhancement on stages of primary and Secondary Signal Processing // Proc. EUSAR'96, Konigswinter, Germany, March 1996.—P. 135—138.
  14. Keydel W. SAR Technique and technology, its present state of the art with respect to user requirements // Proc. EUSAR'96, Konigswinter, Germany, 1996.—P. 19—24.
  15. Ko J., Lee J.-H. Center-weighted median filters and their application to image enhancement // IEEE Trans.—1991.—CAS-38.—P. 984—993.
  16. Kuan D. T., Sawchuk A. A., Strand T. C., Chavel P. Adaptive restoration of images with speckle // IEEE Trans.—1987.—ASSP-35, N 3.—P. 373—383.
  17. Kulemin G. P., Kurekin A. A., Lukin V. V., Zelensky A. A. Soil moisture and erosion degree estimation from multichannel microwave remote sensing data // Remote sensing for agriculture, forestry and natural resources: Proc. SPIE/EUROPTO Series, Paris, France, Sept. 1995.—2585.—P. 144—155.
  18. Kulemin G. P., Lukin V. V., Ponomarenko N. N., et al. Influence of phase fluctuations in troposphere on SAR calibration accuracy // Proc. Second Inter. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition, San Francisco, CA, USA, June 1996.—Vol. II.—P. II-434—II-443.
  19. Lee J.-S. Speckle Analysis and smoothing of synthetic Aperture radar images // Computer Vision, Graphics and Image Processing.—1981.—17.—P. 24—32.
  20. Lee J.-S. Digital Image Smoothing and the Sigma Filter // Comput. vision, Graphics and Image Proc.—1983.—24.—P. 255—269.
  21. Lee Y.-H., Fam Adly T. An edge gradient enhancing Adaptive order statistic filter // IEEE Trans., May 1987.—ASSP-35, N 5.—P. 680—695.
  22. Lukin V. V., Kurekin A. A., Melnik V. P., Zelensky A. A. Application of order statistic filtering to multichannel radar Image Proc. // Proc. of IS@T / SPIE Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, San Jose, CA, USA, Feb. 1995.—Vol 2424.—P. 302—312.
  23. Lukin V. V., Melnik V. P., Miao Zhenjiang, et al. Expert system for radar Image recognition / Filtering // Proc. MMET'94. — Kharkov, 1994.—P. 229—232.
  24. Lukin V. V., Melnik V. P., Pogrebniak A. B., et al. Digital adaptive robust algorithms for radar image filtering // J. Electronic Imaging.—1996.—5(3).—P. 410—421.
  25. Lukin V. V., Melnik V. P., Pogrebniak A. B., Zelensky A. A. Techniques and algorithms of speckle noise reduction for One-Look SAR Images // Proc. EUSAR'96, Konigswinter, Germany, March 1996.—P. 167—170.
  26. Lukin V. V., Melnik V. P., Zelensky A. A., et al. Iterative Nonlinear filtering algorithm with Application to SAR and medical image processing // Proc. IEEE nordic signal Proc. Symp., Espoo, Finland, Sept. 1996.—P. 299—302.
  27. Lukin V. V., Miao Zhenjiang, Yuan Baozong. Multifrequency remote sensing radar images processing and analysis // Proc. IEEE TENCON'93, Beijing, China, Oct. 1993.—P. 1042—1045.
  28. Lukin V. V., Ponomarenko N. N., Astola J. T., Saarinen K. Algorithms of image nonlinear adaptive filtering using fragment recognition by expert system // Proc. IS@T/SPIE Symp. electronic imaging: Science and technology, San Jose, CA, USA. — SPIE, 1996.—Vol. 2662.—P. 179—190.
  29. Lukin V. V., Ponomarenko N. N., Zelensky A. A., et al. Modified sigma filter for processing of images corrupted by multiplicative and impulsive noises // Proc. EUSIPCO'96, Trieste, Italy, Sept. 1996.—Vol. III.—P. 1909—1912.
  30. Nieminen A., Heinonen P., Neuvoo Y. A New class of detail-preserving filters for image processing // IEEE Trans. Jan. 1987.—PAMI-9, N 1.—P. 74—90.
  31. Pitas I., Venetsanopoulos A. N. Nonlinear digital filters: Principles and applications. — New York: Kluwer, 1990.—392 p.
  32. Pratt W. K. Digital image processing.—Second ed. — New York: John Wiley @ Sons, Inc., 1991.—698 p.
  33. Restrepo A., Bovik A. C. Adaptive trimmed filter for image restoration // IEEE Trans.—1988.—ASSP-36, N 8.—P. 1326—1337.
  34. Russo F., Ramponi G. Introducing a fuzzy median filter // Proc. EUSIPCO'94, Signal Proc. VII: Theories and Applications, Edinburgh, UK.—1994.—P. 963—966.
  35. Sun T. Design of Order statistic based filters for image processing applications: Thesis for the Degree of Doctor of Technology. — Tampere, 1994.—146 p.
  36. Szekielda K.-H. Satellite monitoring of the Earth. — New York: Wiley, 1989.—326 p.
  37. Taguchi A., Meguro M. Adaptive L-filters based on fuzzy rules // Proc. IS@T/SPIE Symp. Electronic imaging: Science and Technology, San Jose, CA, USA, Feb. 1995.—2424.—P. 76—84.
  38. Zelensky A., Kurekin A., Lukin V., Ponomarenko N. Techniques of scene radar image processing and their recognition by expert system // Signal / Image Processing and Pattern Recognition: Proc. Second All-Ukrainian Inter. Conf. — Kiev, 1994.—P. 163—167.
  39. Zelensky A. A., Lukin V. V., Melnik V. P., et al. Airborne multichannel remote sensing data processing techniques and software // Proc. Second Airborne Remote Sensing Con. and Exhibition, San Francisco, CA, USA, June 1996. — 1996.—Vol. III.—P. III-151—III-159.

## GOALS, METHODS, AND ALGORITHMS OF LOCALLY-ADAPTIVE ROBUST FILTERING OF RADAR IMAGES

### V. V. Lukin

The goals, methods, and algorithms of robust locally-adaptive filtering of radar images corrupted with multiplicative and impulsive noises are considered. The methods allow efficient noise suppression and spike removal, and at the same time they preserve object edges and fine details. The filter properties are illustrated for actual remote sensing data.

УДК 528.7:681.3

# Оптимальне цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень

В. М. Фроленко

Академія Збройних сил України, Київ

*Надійшла до редакції 18.11.97*

Розглянуто можливості комп'ютерного синтезування зональних цифрових аерокосмічних зображень з метою забезпечення максимальної колірної відмінності між об'єктом та фоном на екрані монітора. Зроблено оцінку підвищення ефективності синтезування деяких зональних аерокосмічних знімків.

Колірне синтезування зональних аерознімків є природним заходом ефективного десифрування матеріалів багатоспектрального аерокосмічного моніторингу. Воно дозволяє комбінувати монохроматичні зональні зображення з метою виявлення багатьох десифрувальних ознак об'єктів на єдиному колірносинтезованому зображені [1]. Колірне синтезування значно підвищує ефективність десифрування малоконтрастних об'єктів аероландшафту — елементів рельєфу, геологічних утворень, тонкої гідрографічної структури і прибережної смуги, рослинного покриву, польових доріг, димових факелів, нафтових забруднень місцевості та води, затіненіх об'єктів тощо [5]. Колірне синтезування концентрує в одному зображені інформацію, яка розсіяна в комплекті монохроматичних зональних зображень, що найбільш повно відповідає особливостям її сприймання людиною.

Традиційним та широко розповсюдженим є спосіб оптичного синтезування зональних аерокосмічних знімків з використанням аналогових оптико-електронних пристрій синтезу [4]. Такі пристрій складаються з окремих оптических проекторів зональних знімків та спільнотого проглядового екрана, на якому здійснюється їх прецизійне сполучення в єдине синтезоване зображення. Для регулювання світлового потоку в кожному проекційному каналі

© В. М. ФРОЛЕНКО, 1998

є набори нейтральних світлофільтрів і/або електричні регулятори джерел освітлювання, а для змінювання кольоровості синтезованого зображення — набори світлофільтрів основних і/або додаткових кольорів.

Оптичному синтезуванню зональних аерокосмічних знімків притаманні такі основні недоліки. Відсутні чітко визначені методики оптимального синтезування, тобто такого синтезування, що забезпечує максимально можливу колірну відмінність між об'єктом та фоном на синтезованому зображені. По-друге, навіть при наявності такої методики неможливо її реалізувати на існуючому десифрувальному обладнанні внаслідок значної складності обчислень. По-третє, колірне охоплення існуючих зразків оптических пристрій синтезу обмежене, що ілюструється рис. 1. По-четверте, аналогові пристрій складні, неергономічні, мають значні похибки регулювання та велику кількість органів контролю. Нарешті, наявність проблем оптико-механічного сполучення зональних аерознімків під час синтезування, що спричиняє завал функції передавання модуляції синтезованого зображення  $T_c(\nu)$  згідно з формулою [11]

$$T_c(\nu) = \exp[-2(\pi\delta_c\nu)^2] \operatorname{sinc}(\pi\delta_n\nu), \quad (1)$$

де  $\delta_c$  — діаметр плями розсіяння проекційної оп-

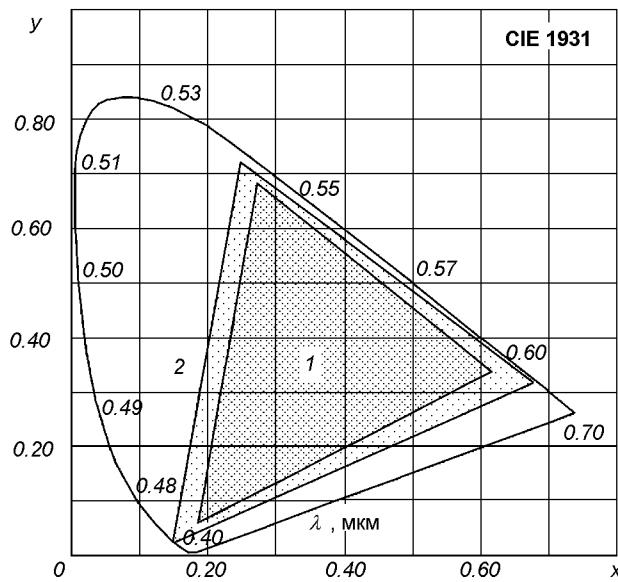


Рис. 1. Колірне охоплення пристрій відображення: 1 — оптичний прилад синтезу MSP-4C, 2 — комп’ютерний монітор

тичної системи на рівні 0.606 від максимального значення,  $\delta_n$  — залишкове несполучення зональних зображень,  $v$  — просторова частота.

Найбільш перспективним методом позбавлення від вказаних недоліків слід вважати цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень за допомогою потужних цифрових графічних станцій [6]. Сучасні технології цифрової обробки зображень дозволяють реалізувати досить складні алгоритми, в тому числі і багатозонального колірного синтезування, тим більше, що деякі зразки нових оптико-електронних систем аерокосмічного спостереження дозволяють формувати безпосередньо цифрові зображення [10].

Розглянемо спрощену модель визначення оптичного сигналу, наприклад, оптичного пропускання, в одному із зональних каналів багатоспектральної апаратури дистанційного спостереження в діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання від  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ . Оптичне пропускання  $\tau_0$  зображення об’єкта складе

$$\tau_0 = k_b \left[ \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} S_b(\lambda) d\lambda \right]^{\gamma_b(\lambda)}, \quad (2)$$

де  $\rho_0(\lambda)$  — спектральний розподіл коефіцієнта оптичного відбиття об’єкта,  $S_b(\lambda)$  — зведена спектральна світлочутливість приймального пристрію,  $\gamma_b(\lambda)$  — узагальнений показник передавання оптич-

ного сигналу у відеотракті оптико-електронної апаратури,  $k_b$  — коефіцієнт підсилення відеотракту. Останній, як правило, змінюється при умові забезпечення необхідного середнього зонального оптичного сигналу  $\hat{\tau}$ . По аналогії з (2) можна записати

$$k_b = \hat{\tau} \left[ \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} S_b(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) d\lambda \right]^{-\gamma_b(\lambda)}, \quad (3)$$

де  $\bar{\rho}(\lambda)$  — середній спектральний коефіцієнт оптичного відбиття аероландшафту. Через те, що спектральний діапазон реєстрації  $\Delta\lambda$  звичайно досить вузький, приймемо  $S_b(\lambda)$  та  $\gamma_b(\lambda)$  постійними в його межах, тим більше, що в існуючих оптико-електронних системах для цього вживають спеціальних заходів. Тоді підстановка (3) в (2) дозволяє одержати вираз для зонального оптичного сигналу:

$$\tau_0 = \hat{\tau} \left[ \frac{\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \rho_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \bar{\rho}(\lambda) d\lambda} \right]^{\gamma_b}. \quad (4)$$

Якщо далі виконується оцифрування зонального зображення, то цифровий код інтенсивності елемента растроу  $D_0$ , який належить об’єкту, за умовою забезпечення максимального амплітудного діапазону сигналу складе [9]

$$D_0 = \frac{D_w}{2} \left[ \frac{\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \rho_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \bar{\rho}(\lambda) d\lambda} \right]^{\gamma_b \gamma_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

де  $\gamma_{\text{ц}}$  — показник передавання цифрувального пристрою,  $D_w$  — максимально можливий код градації інтенсивності (рівень білого) цифрового зображення. Так, для восьмироздрядного цифрового коду  $D_w = 255$ . Порядок формування цифрового аерокосмічного зображення пояснюється рис. 2.

Нехай три цифрових зональних зображення  $D_{0j}$ ,  $j = 1, 2, 3$ , відображаються на екрані монітора, причому їхні цифрові коди взяті з деякими масштабуючими коефіцієнтами  $w_j$ . Тоді спектральний розподіл оптичного потоку в  $r$ -му колірному каналі зображення об’єкта,  $r = \{R, G, B\}$ , складе [7]

$$\Phi_{0r}(\lambda) = k_m \sigma_{mr}(\lambda) [w_j D_{0j}]^{\gamma_m}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{mr}(\lambda)$  — спектральна густина потоку випромінювання  $r$ -го кольорового люмінофору кінескопа,  $\gamma_m$  — показник передавання цифрового сигналу монітором,  $k_m$  — коефіцієнт підсилення монітора. Порядок формування кольорового зображення на екрані пояснюється рис. 3.

Сумарний спектральний оптичний потік на син-

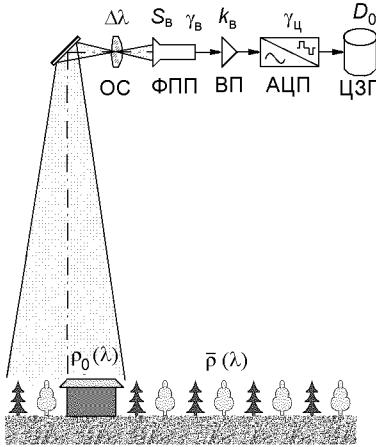


Рис. 2. Порядок формування цифрового зонального аерокосмічного зображення: ОС — оптична система, ФПП — фотоприймальний пристрій, ВП — відеопідсилювач, АЦП — аналогово-цифровий перетворювач, ЦЗП — цифровий запам'ятовуючий пристрій

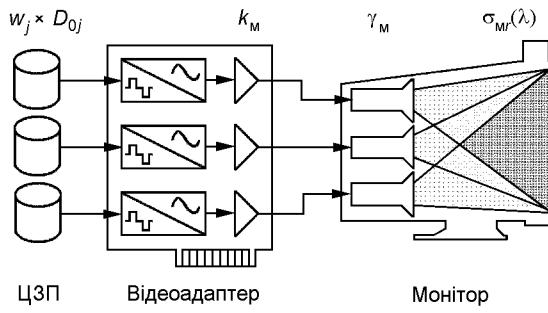


Рис. 3. Порядок формування кольорового синтезованого цифрового зображення

тезованому зображені об'єкта  $\Phi_0(\lambda)$  буде дорівнювати

$$\Phi_0(\lambda) = k_m \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_m}, \quad (7)$$

а спектральний потік  $\Phi_w(\lambda)$ , який відповідає рівню білого, —

$$\Phi_w(\lambda) = k_m (D_w)^{\gamma_m} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda). \quad (8)$$

Тепер задача оптимального синтезування зональних цифрових зображень зводиться до визначення такої системи коефіцієнтів  $w_j$ , яка забезпечить найбільшу колірну відмінність  $\Delta E$  між зображеннями об'єкта і фону на синтезованому цифровому зображені. В [12] запропонована модель, яка опирається на оцінку колірного контрасту за стандартною міжнародною рівноконтрастною колори-

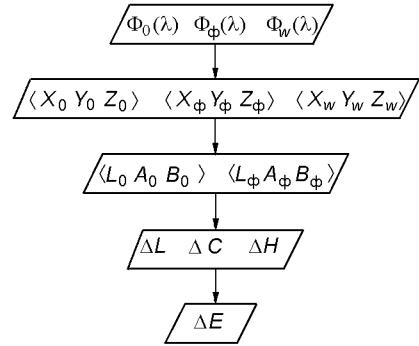


Рис. 4. Порядок розрахунку колірної відмінності на синтезованому цифровому зображені

метричною системою CIE LAB 1994 [14]. Суть цієї моделі полягає у послідовності перерахунків спектральних оптических потоків в зображеннях об'єкта  $\Phi_0(\lambda)$  і фону  $\Phi_w(\lambda)$  до їх кольорів  $\langle X_0, Y_0, Z_0 \rangle$  та  $\langle X_r, Y_r, Z_r \rangle$  в колориметричній системі CIE XYZ 1931, потім — до параметрів рівноконтрастної колориметричної системи, і тільки потім — до власне колірної відмінності, як на рис. 4.

Кольори синтезованого зображення об'єкта визначаються за такими формулами:

$$\begin{aligned} X_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z_0 &= \int_{V(\lambda)} \Phi_0(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  — криві додавання колориметричної системи CIE XYZ 1931,  $V(\lambda)$  — спектральна область фізіологічної чутливості. Кольори фону та рівня білого визначаються аналогічно. Підстановка (7) та (8) в (9) дозволяє виразити відносні кольори об'єкта через систему масштабних коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \frac{X_0}{X_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_m} \bar{x}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_m} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}, \\ \frac{Y_0}{Y_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_m} \bar{y}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_m} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \\ \frac{Z_0}{Z_w} &= \frac{\int_{V(\lambda)} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) [w_r D_{0r}]^{\gamma_m} \bar{z}(\lambda) d\lambda}{(D_w)^{\gamma_m} \sum_r \sigma_{mr}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}. \end{aligned}$$

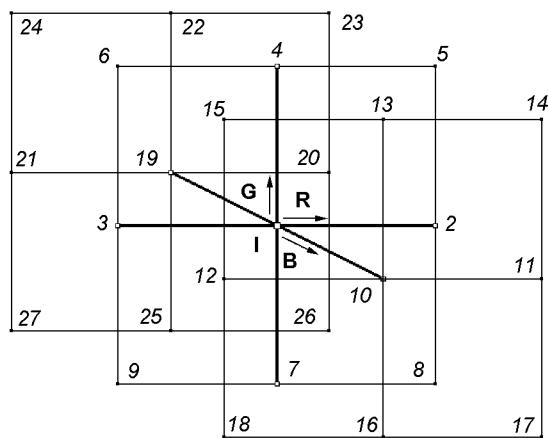


Рис. 5. Градієнтний пошук в просторі масштабних коефіцієнтів

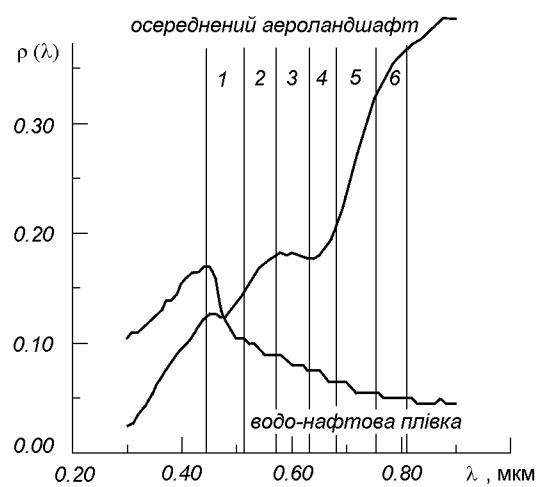


Рис. 6. Спектральні характеристики відбиття об'єктів аероландшафту

Рис. 7. Результати оптимального цифрового синтезування зональних аерокосмічних знімків: *a, b, c* — вихідні зональні зображення в каналах *1, 2, 4, 6* відповідно, *d* — кольоровосинтезоване за допомогою оптичного приставки синтезу зображення, *e* — власне результат оптимального цифрового синтезування

Таблиця 1. Зони спектральної чутливості реєструючих каналів багатозональної аерофотоапаратури МКФ-6М

Канал реєстрації	1	2	3	4	5	6
$\Delta\lambda$ , мкм	0.45—0.51	0.52—0.57	0.57—0.63	0.63—0.68	0.68—0.75	0.76—0.81

Таблиця 2. Значення колірної відмінності між об'єктами та фонами на синтезованих цифрових зображеннях

Фони, об'єкти	Грунти чорноземні	Грунти опідзолені	Гірничі породи	Глина, вапняк	Водна поверхня	Такир	Хвойні рослини	Листяні рослини	Різновиди трав'яного покриву	Нестілі культури	Доспілі культури	Виноградник
Грунти чорноземні	43, 109 6 6 2 16 16 13	63, 400 3 3 6 10 10 7										
Грунти опідзолені		47, 467 6 3 6 7 9 7	53, 660 2 5 2 8 16 8		40, 092 1 6 1 9 16 11							
Гірничі породи					45, 768 1 5 1 6 13 6							
Глина, вапняк			48, 959 6 1 6 8 12 8		78, 590 6 1 6 8 16 8							
Водна поверхня	119, 802 3 6 3 1 16 1	118, 833 3 6 3 1 16 1	140, 112 6 1 6 8 16 8		81, 972 5 1 5 11 5 11	134, 556 3 6 3 1 16 1	149, 464 4 6 4 1 11 1	155, 027 3 6 3 1 16 1	122, 901 3 6 3 1 16 1		139, 319 3 6 3 1 16 1	
Нафта	77, 490 6 1 6 5 6 5	54, 438 5 1 5 10 8 10	109, 864 6 1 6 8 16 8	57, 365 3 5 3 2 14 2	28, 892 6 1 6 11 4 11	66, 854 6 1 6 15 14 16	74, 673 6 6 1 11 11 11	77, 147 1 1 6 14 14 15				
Хвойні рослини	27, 651 6 1 6 7 13 8	58, 223 6 1 5 4 10 5					26, 279 1 6 1 15 6 15	36, 253 1 6 1 10 4 10				
Листяні рослини	53, 810 1 6 1 6 5 6	58, 094 6 1 6 6 11 8						28, 339 5 2 5 5 12 5				
Різновиди трав'яного покриву	99, 310 1 6 4 11 13 10	61, 544 1 6 1 6 5 6	69, 618 1 1 6 11 11 6	113, 439 1 6 1 8 16 8	67, 531 1 6 1 15 15 16							
Нестілі культури	47, 360 6 6 4 15 15 12	19, 438 4 2 4 8 10 8				35, 940 6 1 6 6 15 6	50, 634 1 6 1 11 9 11	57, 618 1 6 1 11 9 11				
Доспілі культури	83, 741 1 6 1 7 8 7	48, 913 1 6 1 6 5 6				39, 778 3 3 1 13 13 15	35, 126 6 4 6 5 14 5	62, 062 5 4 5 4 13 4	50, 090 1 4 1 8 9 8			
Виноградник	49, 266 1 4 1 9 8 9	43, 025 5 3 5 7 9 8					66, 966 1 6 1 13 12 13	83, 869 1 6 1 13 12 13	65, 941 3 4 3 7 8 7	49, 611 1 6 1 11 10 11		

Примітка. У першому рядку — кількість порогів рівноконтрастної колориметричної системи CIE LAB 1994, у другому рядку — спектральні зони апаратури МКФ-6М в RGB-каналах синтезованого зображення, у третьому рядку — коефіцієнти чисельників синтезування зі знаменником 8 в RGB-каналах

Далі можна розрахувати проміжні кольорові величини  $L_0$ ,  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $H_0$  для об'єкта:

$$L_0 = 116 \sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} - 16,$$

$$A_0 = 500 \left( \sqrt[3]{\frac{X_0}{X_w}} - \sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} \right),$$

$$B_0 = 200 \left( \sqrt[3]{\frac{Y_0}{Y_w}} - \sqrt[3]{\frac{Z_0}{Z_w}} \right),$$

$$C_0 = \sqrt{A_0^2 + B_0^2},$$

$$H_0 = \arctg \frac{B_0}{A_0}.$$

Нарешті, колірна відмінність на синтезованому

цифровому зображені визначається як

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{w_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{w_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{w_H}\right)^2},$$

де  $\Delta L = L_o - L_\phi$  — різниця яскравостей об'єкта і фону,  $\Delta C = C_o - C_\phi$  — відмінність за кольоровістю між об'єктом і фоном,  $\Delta H = H_o - H_\phi$  — відмінність за насиченістю між об'єктом і фоном,  $w_L$ ,  $w_C$ ,  $w_H$  — відповідні вагові коефіцієнти.

Очевидно, що оптимізація функції  $\Delta E(w_R, w_G, w_B)$  повинна виконуватися кількісними методами, наприклад, методом градієнтного пошуку в просторі коефіцієнтів  $w_r$  [12]. Нехай задані межі їх можливих значень та дискретна величина кроку зміни. Процедура пошуку на черговій ітерації передбачає перевірку значень функції у 26 сусідніх точках (рис. 5) на екстремум з послідовним перенесенням центру пошуку в його точку. Ітераційний процес закінчується при досягненні екстремуму або виході за межі змінювання на наступному кроці хоч би одного із значень коефіцієнтів  $w_r$ . Запам'ятовування результатів розрахунків на попередньому кроці дозволяє скоротити потрібний обсяг обчислювань в середньому на 60 %.

Для перевірки викладених теоретичних положень зроблені розрахунки масштабних коефіцієнтів  $w_r$  оптимального колірного цифрового синтезування зональних зображень типових об'єктів та фонів аерокосмічного моніторингу методом градієнтного пошуку. Як приклад розглянуто синтезування оцифрованих аерокосмічних знімків багатозональної аерофотографічної апаратури МКФ-6М з метою виявлення нафтових забруднень аероландшафті. Відповідні спектральні характеристики наведені на рис. 6, на графік також нанесено зони спектральної чутливості усіх каналів реєстрації МКФ-6М (табл. 1).

Результати цифрового синтезування згідно з поданою методикою ілюструються рис. 7, де для порівняння показані чотири вихідних зональних зображень, а також колірносинтезоване за допомогою оптичного приладу синтезу зображення. Колірний контраст між зображеннями нафтової плівки (усередині червоного кола) та фоновою рослинністю на цифровому синтезованому аерознімку вище майже у 2 рази при розгляданні на екрані монітора з типовим показником передавання  $\gamma_m = 2.18$  [13]. В табл. 2 містяться результати розрахунків параметрів оптимального цифрового синтезу для різноманітних сполучень «об'єкт—фон» при  $\gamma_b = 1.26$  [3, 8],  $D_w = 255$  та відносних спектральних характеристиках кольорового монітора [7], які показані на рис. 8.

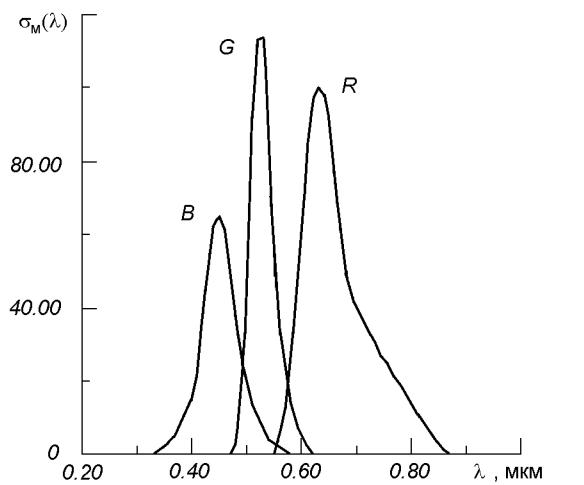


Рис. 8. Відносна спектральна густина потоку випромінювання люмінофорів кінескопа: R — червоний, G — зелений, B — синій

Результати моделювання свідчать, що, по-перше, цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень дозволяє підвищити кількість порогів колірної відмінності між об'єктами та фонами відносно оптичного синтезування [7] в середньому в 15.1 рази. По-друге, в більшості випадків для досягнення максимального колірного контрасту достатньо тільки двох зональних аерокосмічних знімків.

Таким чином, оптимальне цифрове синтезування зональних аерокосмічних зображень є добрим інструментом підвищення загальної ефективності дешифрування матеріалів багатоспектрального аерокосмічного моніторингу.

1. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1983.—374 с.
2. Алмазов И. В., Стеценко А. Ф., Севастьянова М. Н. Оценка качества многоゾональных и синтезированных фотоизображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1994.—№ 2.—С. 111—117.
3. Евтеева Н. П., Беликов В. И., Петрова Л. А., Козлова Л. Н. Оценка цветопередачи съемочных объективов // Оптич. журн.—1993.—№ 5.—С. 67—70.
4. Ильинский Н. Д., Обидалов А. И., Фостиков А. А. Фотограмметрия и дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1986.—376 с.
5. Книжникова Ю. Ф., Кравцова В. И. Области эффективного применения многоゾональной космической съемки // Многоゾональная аэрокосмическая съемка и ее использование при изучении природных ресурсов. — М.: МГУ, 1976.—С. 7—14.
6. Краснопевцев Б. В. Фотограмметрическая рабочая станция SD 2000 LEICA и ее исследования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1995.—№ 2.—С. 110—113.

- 
7. Новаковский С. В. Цвет в цветном телевидении. — М.: Радио и связь, 1988.—288 с.
  8. Павлов И. М., Якубов Н. Т. Аэрофотография. — М.: Недра, 1991.—335 с.
  9. Певзнер Б. М. Качество цветных телевизионных изображений. — М.: Радио и связь, 1988.—224 с.
  10. Техника получения изображений высокой четкости // Иностранный печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. «Технические средства разведывательных служб капиталистических государств», 1996.—№ 1.—С. 15—19.
  11. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: Пер. с нем. — М.: Мир, 1978.—670 с.
  12. Фроленко В. М. Методика комплексного дешифрования зональных аэрокосмічних знімків з використанням оптичного приладу синтезу // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5-6.—С. 47—54.
  13. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. — М.: ЭКОМ, 1997.—336 с.
  14. Berns R. S. Colorimetry: The Basics & Materials Applications // Optics & Photonics News, 1995.—6, N 9.—P. 23—27.
- 

### OPTIMAL DIGITAL SYNTHESIS OF ZONAL AEROSPACE IMAGES

V. M. Frolenko

Possibilities of computer synthesis of zonal digital aerospace images are considered with the purpose of providing the greatest colour distinction between the object and background on the monitor screen. Increase in the efficiency of the synthesis of some zonal aerospace images is estimated.

УДК 528.8:632.578/579:635.64

## Використання дистанційного зондування для оцінки дії стресових факторів на рослинність

О. А. Войнов

Інститут агроекології і біотехнології УААН

*Надійшла до редакції 03.10.97*

Приведені результати дистанційних польових досліджень інформативності спектрального електромагнітного випромінювання у видимій і близькій ІЧ-смузах спектру з метою оцінки фітопатологічного стану томатів. Встановлено, що найінформативнішою є близька ІЧ-область. Застосування дистанційних методів дозволяє виявити захворювання на ранніх стадіях розвитку (інкубаційний період) до появи його візуальних ознак.

У численних дослідженнях, проведених у різних країнах, виявлена можливість застосування дистанційних методів (ДМ) для обстеження територій, зайнятих сільськогосподарськими культурами, з метою оцінки їхнього фіtosанітарного стану [1, 7, 11, 14, 17, 18]. Часто для цього використовують так званий коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ).

Дистанційно оцінити фітопатологічний стан сільськогосподарських угідь за допомогою КСЯ дозволяє різниця в реакції хворих та здорових рослин на сонячне випромінювання в різних його ділянках [3, 5]. Поглинання променевої енергії в смузі фізіологічно активної радіації (0.35—0.75 мкм) визначається головним чином такими пігментами, як хлорофіли та каротиноїди. В смузі спектру  $\lambda$  0.75—1.2 мкм пігменти практично нейтральні і оптичні властивості зеленого листя визначаються переважно структурою тканин листя. В цій смузі спектру тканини мезофілу здорового листя з високим тургором прекрасно відбивають падаюче випромінювання. Внаслідок дії екстремальних факторів відбувається падіння тургору тканин і кількісні зміни хлорофілу в клітинах стовбчатої паренхіми [3, 6, 12, 16].

На перших етапах розробки методів дистанційного зондування (ДЗ) дослідження повинні бути комплексними, тобто дані необхідно підтвердити різноманітними даними контактних наземних вимірювань, які є метрологією для дистанційних досліджень [2, 3, 19]. Наприклад, патофізіологічні зміни у рослинному організмі на початкових етапах захворювання можна зафіксувати, застосовуючи фізіологічні методи дослідження клітин продихового комплексу, а також біоелектричні показники рослинних тканин [8, 9]. Поява візуальних ознак ураження рослин тим чи іншим патогеном свідчить про незворотність фізіологічних та біохімічних змін.

У наше завдання входило відпрацювання методів оцінки дії стресових факторів на рослинний організм на основі змін КСЯ. Як стресові фактори, які найчастіше призводять до змін в розвитку рослин, було вибрано вірусну інфекцію та підвищенні норми азотних добрив. Останнє часто трапляється при неякісному внесенні добрив на полях. Оцінку негативного впливу факторів проводили на одній з найпоширеніших овочевих культур — томатах, вирощених на дослідних ділянках Інституту екологічної генетики АН Молдови.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Схема досліду включала: контроль (№ 60), трьохкратну норму азотних добрив (№ 180), зараження рослин нульовим штамом вірусу тютюнової мозаїки (ВТМ-0) і сумарну дію підвищених доз живлення і зараження (азот + вірус). Грунт — чорнозем звичайний. Розмір ділянки складав  $7.3 \times 2.5$  м.

Розсаду висадили 18—19 травня, зараження рослин інфекційним інокуллюмом виконано у фазі початку бутонізації першої китиці (18 червня). Вимірювання проводили на 7-й, 21-й і 41-й день після інокуляції (відповідно 25 червня, 8 і 28 липня).

При першому вимірюванні розвиток патогена знаходився на початковій (інкубаційній) стадії, коли видимі прояви ураження відсутні, при другому вимірюванні симптоми хвороби візуально ледь проявлялись, тоді як при третьому їх було чітко видно.

КСЯ вимірювали в інтервалі довжин хвиль 400—1070 нм, через кожні 10 нм за допомогою польового спектрофотометра, розробленого в ДКБ «Інтеграл» Ленінградського держуніверситету. Прилад працює на принципі порівняння яскравості об'єкта і освітленості від неба. Під час вимірювань спектрометр встановлювали на триподі на висоті 0.6—0.7 м від землі, кутове поле зору приладу дорівнювало  $17^\circ$ . За такої висоти в об'єктив спектрометра попадала ділянка діаметром 20—25 см. Час реєстрації одного спектру — 1 хв, відносна помилка вимірювань КСЯ — 1—3 %. Значення КСЯ записували на гнучкий магнітний диск.

Для оцінки впливу варіантів досліду на кількісний склад пігментів одночасно з дистанційною зйомкою визначали кількість хлорофілів та каротиноїдів в листі рослин.

## ОБРОБКА ДАНИХ

Для розрахунків було використано стандартну програму дисперсійного аналізу, розроблену в ЦАМ АН Молдови. В якості спектральних характеристик

нами взяті значення КСЯ на окремих ділянках спектра відбиття і розраховані на їх основі різні вегетативні індекси (BI). Перевагу відано чотирьом довжинам хвиль: синій 480 (C), зелений 560 (З), червоний 670 (Ч) та більш інформативно відображають зелену рослинність [13].

В якості BI застосовані дві категорії комплексних спектральних характеристик: індекси-відношення і ортогональні *n*-вимірні індекси. Індекси відношення створені шістьма можливими парними комбінаціями КСЯ в чотирьох вибраних діапазонах при діленні більшої довжини хвилі на меншу: З/C, Ч/C і т. д. До них можна віднести і більш складні — так звану нормалізовану різницю (НР), розраховані як відношення різниці КСЯ БІЧ та види мого діапазону спектру до їх суми.

В даному дослідженні було використано три таких BI:

$$HP_C = (B_1 - C) / (B_1 + C),$$

$$HP_Z = (B_1 - Z) / (B_1 + Z),$$

$$HP_{\text{Ч}} = (B_1 - \text{Ч}) / (B_1 + \text{Ч}).$$

Із багатовимірних індексів для аналізу були вибрані:

— чотири- і двовимірний індекс зеленості:

$$G_4 = -0.288C - 0.3003 - 0.581\text{Ч} + 0.700B_1,$$

$$G_2 = -0.851\text{Ч} + 0.526B_1;$$

— чотири- і двовимірний індекс яскравості:

$$B_4 = 0.277C + 0.4023 + 0.509\text{Ч} + 0.709B_1,$$

$$B_2 = 0.525\text{Ч} + 0.851B_1.$$

Ці індекси добре зарекомендували себе при дослідженні фітоценозів. Коєфіцієнти рівнянь при значеннях КСЯ у відповідних смугах спектру розраховані за методом, запропонованим Джексоном [15].

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТИВ ДОСЛІДУ

Посилення азотного живлення призвело до поступового збільшення загального хлорофілу (*a+b*) та каротиноїдів (табл. 1). На 41-й день їхні величини дорівнювали відповідно: в контролі — 6.04 і

Таблиця 1. Кількість пігментів в листі томатів під впливом ВТМ-0 та азотних добрив на 7-й, 21-й та 41-й день

Варіанти	Хлорофіл а			Хлорофіл а+b			Каротиноїди			Хлорофіл + каротиноїди		
	7	21	41	7	21	41	7	21	41	7	21	41
Контроль (№ 60)	3.31	3.00	4.71	4.17	3.28	6.04	1.37	1.26	1.83	5.54	4.54	7.87
№ 180	3.52	3.48	4.83	4.41	4.31	6.24	1.51	1.53	1.84	5.92	5.84	8.08
ВТМ-0	3.28	3.06	4.02	4.28	3.90	5.28	1.41	1.36	1.62	5.59	5.26	6.90
ВТМ+№ 180	3.10	3.70	3.06	4.07	4.62	4.14	1.29	1.57	1.29	5.36	6.26	5.43

Таблиця 2. Р-значення впливу азотного живлення (А) та вірусного ураження (В) на кількість пігментів у листі томатів

Пігменти	7-й день			21-й день			41-й день		
	А	В	AB	А	В	AB	А	В	AB
Хлорофіли: <i>a</i>	0.947	0.067	0.106	0.0005	0.040	0.310	0.006	0.0001	0.002
<i>b</i>	0.253	0.947	0.172	0.0005	0.0109	0.813	0.670	0.0005	0.838
<i>a+b</i>	0.922	0.138	0.110	0.0002	0.017	0.436	0.024	0.0001	0.008
<i>a/b</i>	0.004	0.0005	0.947	0.674	0.327	0.802	0.0005	0.0002	0.0001
Каротиноїди	0.813	0.024	0.072	0.008	0.493	0.947	0.0018	0.0001	0.001

1.83 мг/дм<sup>2</sup>; при № 180 — 6.24 і 1.84 мг/дм<sup>2</sup>.

Дещо складніший зв'язок спостерігається між пігментами та вірусним зараженням. Спочатку захисна реакція томатів на стрес призвела до посилення синтезу пігментів і їхнього накопичення. Так, на 21-й день після зараження кількість хлорофілів у варіанті з ВТМ-0 дорівнювала 3.90 мг/дм<sup>2</sup>, каротиноїдів — 1.36, у контролі відповідно 3.28 і 1.26; на 41-й день хлорофілів у досліді було 5.28, а у контролі — 6.04 мг/дм<sup>2</sup>, каротиноїдів — 1.62 і 1.83 мг/дм<sup>2</sup>. Аналогічна залежність спостерігається і у варіанті ВТМ-0 + № 180 із значним зменшенням кількості пігментів на 41-й день розвитку хвороби: сума хлорофілів досягла величини 4.14 проти 6.04 у контролі; сума хлорофілів з каротиноїдами — 5.43, тоді як у контролі — 7.87 мг/дм<sup>2</sup>.

Аналізуючи значимість ( $P < 0.05$ ) впливу азотних добрив і вірусу на накопичення пігментів, можна стверджувати, що захворювання більш суттєво впливає на вміст пігментів (табл. 2).

#### РЕАКЦІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОМАТИВ НА СТРЕС

Опираючись на одержані дані про реакцію пігментів на стрес, а також на літературні джерела, можна передбачити, що досліджувані фактори повинні вплинути і на використані нами спектральні характеристики рослин томатів.

На рис. 1 показаний спектр відбиття для томатів сорту «Ністру» на 21-й день після зараження вірусом. Добре видно, що в інтервалі довжин хвиль  $\lambda$  760—1070 нм (БІЧ) величина КСЯ контрольних рослин менша аналогічних значень рослин у варіанті з азотними добривами, але більше величини КСЯ хворих рослин. В червоній смузі спектру спостерігається зворотна тенденція.

На рис. 2, *a* показаний розподіл інформативності КСЯ по спектру для розпізнавання здорових і хворих рослин томатів серед всієї сукупності об'єктів незалежно від фенофази розвитку. Видно, що

найінформативнішою є БІЧ-смуга спектру, але міра її інформативності не перевищує значення 0.3. Це закономірно, зважаючи на те, що часові варіації КСЯ можуть переважити варіації, зумовлені стресом рослин.

Спектральний розподіл інформативності КСЯ для різних стадій розвитку патологічного процесу представлено на рис. 2, *b*—*г*. Для стадії інкубації вірусу характерне зростання інформативності не тільки в БІЧ, але і в синьо-зеленій та червоній частинах спектру; при наявності візуальних проявів зараження висока інформативність зберігається тільки в БІЧ-частині, досягаючи значень 0.6 і більше. На пізнішій стадії хвороби розпізнавання хворих і здорових рослин за значеннями КСЯ знижується,

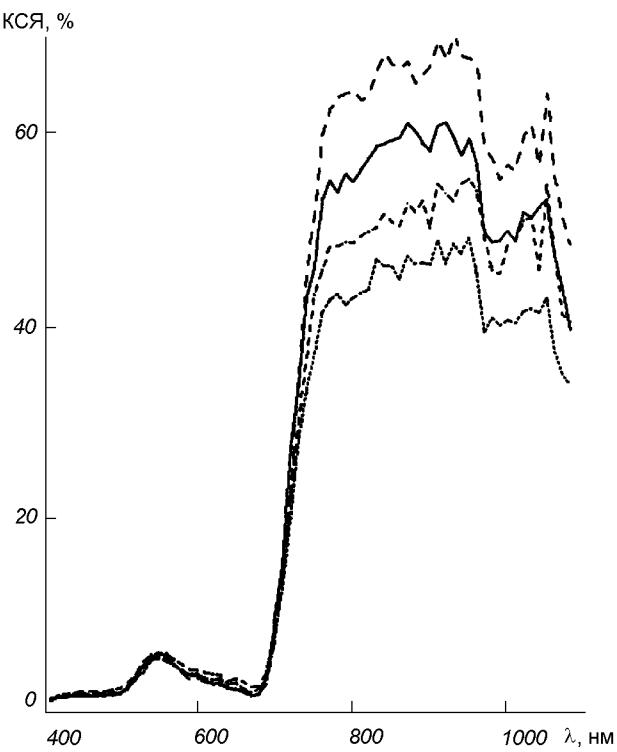


Рис. 1. КСЯ томатів сорту «Ністру» на 21-й день ураження ВТМ-0: суцільна лінія — контроль, штрихова — № 180, штрих-пунктирна — ВТМ-0, пунктир — ВТМ-0 + № 180

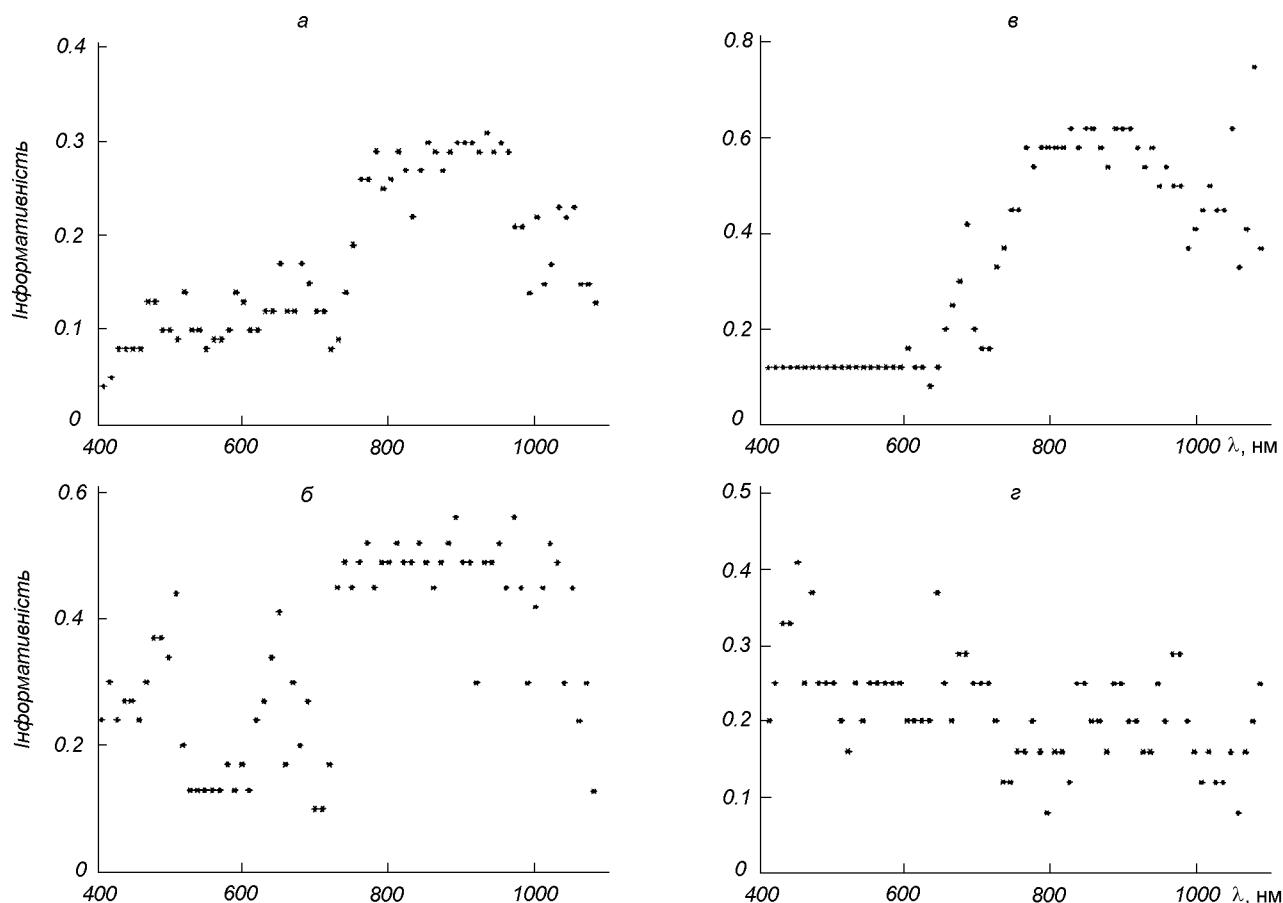


Рис. 2. Розподіл інформативності КСЯ томатів для різних ділянок спектру: *а* — протягом сезону, *б* — на стадії інкубації ВТМ-0, *в* — за візуальних ознак ураження ВТМ-0, *г* — на пізній стадії розвитку ВТМ-0

при відсутності будь-якого чітко визначеного максимуму інформативності.

Як видно із табл. 3, інформативність спектральних характеристик перш за все залежить від фази розвитку рослин і інтенсивності стресу. При цьому найбільша інформативність (якщо виходить із абсолютних значень) була на 21-й день після зараження. Як і слід було очікувати, із окремих ділянок

спектру найінформативнішими були Ч і БІЧ, і як наслідок, комбінації КСЯ на цих довжинах хвиль: НРч і БІЧ/Ч. Достатньо хорошою інформативністю вирізняються також комбінації КСЯ в БІЧ- і З-діапазонах: НРз і БІЧ/З. Слід відмітити, що використання *n*-вимірних ортогональних перетворень не дає переваг у порівнянні з простими відношеннями, а часто навіть поступається перед використанням

Таблиця 3. Оцінка інформативності (%) спектральних ознак рослин томатів в залежності від фази розвитку захворювання ВТМ-0

Дата реєстрації	Спектральна характеристика																
	C	3	Ч	БІЧ	3/C	K/C	K/3	БІЧ/C	БІЧ/3	БІЧ/K	НРч	НРз	НРч	G <sub>2</sub>	G <sub>4</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>4</sub>
25.06	76.4	61.0	71.5	73.0	76.6	53.1	80.1	93.0	82.2	82.6	92.7	82.2	83.7	76.3	77.1	72.7	73.1
08.07	68.7	70.2	88.6	86.1	68.8	90.9	91.7	88.8	86.8	88.5	88.9	87.0	88.3	86.5	86.7	84.8	84.4
28.07	76.0	68.7	77.1	64.8	65.3	70.9	77.5	72.1	73.6	78.2	73.4	74.6	82.8	62.0	61.2	63.7	63.5
По всьому масиву																	
	43.8	41.6	55.1	49.0	41.7	48.8	56.7	56.5	63.8	69.7	57.3	65.9	72.5	50.0	50.5	46.9	44.8

Таблиця 4. Р-значення впливу азотного живлення (А) та вірусного зараження (В) на спектральні характеристики томатів

Спектральна характеристика	7-й день			21-й день			41-й день		
	А	В	АВ	А	В	АВ	А	В	АВ
C	1.000	0.006	0.417	0.430	0.017	0.530	0.155	0.020	0.802
Z	0.246	0.294	0.469	0.133	0.151	0.710	0.262	0.101	0.453
K	0.661	0.017	0.526	1.000	0.0001	0.265	0.067	0.028	0.980
БІЧ	0.609	0.006	0.981	0.115	0.0005	0.965	0.902	0.901	0.990
З/С	0.115	0.024	0.922	0.445	0.068	0.852	0.947	0.220	0.151
Ч/С	0.414	0.813	0.947	0.028	0.0001	0.147	0.072	0.068	0.883
Ч/З	0.609	0.049	0.976	0.017	0.0001	0.176	0.049	0.014	0.404
БІЧ/С	0.302	0.0005	0.472	0.530	0.0001	0.469	0.407	0.024	0.791
БІЧ/З	0.649	0.0001	0.681	0.902	0.0001	0.294	0.457	0.087	0.469
БІЧ/Ч	0.771	0.0005	0.625	0.096	0.0001	0.249	0.087	0.014	0.289
НРс	0.504	0.0001	0.743	0.302	0.0001	0.259	0.327	0.053	0.980
НРз	0.625	0.0001	0.661	0.643	0.0001	0.277	0.397	0.147	0.637
НРч	0.980	0.0005	0.902	0.040	0.0001	0.063	0.155	0.077	0.947
G <sub>2</sub>	0.637	0.003	0.998	0.101	0.0002	0.984	0.980	0.681	0.998
G <sub>4</sub>	0.643	0.003	1.000	0.110	0.0002	0.990	0.984	0.703	0.962
B <sub>2</sub>	0.598	0.008	0.947	0.120	0.0005	0.980	0.838	0.987	0.955
B <sub>4</sub>	0.000	0.008	0.813	0.120	0.001	0.947	0.771	0.980	0.984

значень КСЯ на одній ділянці спектру.

Проаналізуємо тепер табл. 4, де в значеннях Р приведені узагальнені результати оцінки впливу азотного живлення та вірусного зараження на спектральні характеристики.

Вплив азоту на всіх фазах розвитку безпосередньо на значеннях КСЯ суттєво (при Р = 0.05) не відчувається. В той же час на 21-й день азотний вплив виявлено комплексними спектральними характеристиками, зокрема відношеннями Ч/С, НРч, і особливо Ч/З (Р = 0.017). Відношення Ч/З — єдиний параметр, чутливий до азоту і на 41-й день. Оскільки у всіх цих трьох ВІ є КСЯ в червоній частині спектру, можна вважати, що визначальним моментом тут є вміст хлорофілу в листі томатів. І дійсно, якщо на 7-й день суттєва різниця вмісту хлорофілів *a* і *b* між варіантами азотного живлення була відсутня, то на 21-й день Р-значення різниці досягло 0.002 (табл. 2). На 41-й день кількість хлорофілу в листі (5—6 мг/дм<sup>2</sup>) перевищує поріг, до якого, як вважають деякі дослідники [6], вміст пігментів суттєво впливає на зміну спектрального відбиття листя, і виявити підвищені дози азоту можливо лише за відношенням Ч/З.

Вплив вірусної інфекції, на відміну від азоту, було виявлено спектральним вимірюванням вже через тиждень після інокуляції, як безпосередньо за КСЯ (Ч-, БІЧ-ділянки), так і за ВІ, особливо БІЧ/З, БІЧ/Ч, НРч, НРз. На 21-й день хвороба виявляється практично всіма спектральними характеристиками, і особливо добре — індексами-відношеннями.

#### ВПЛИВ ВЗАЄМОДІЇ АЗОТУ І ВІРУСУ

В цілому аналіз даних табл. 4 показує, що найбільш чутливими до дії вірусу та азотного живлення є КСЯ томатів в БІЧ- і Ч-діапазонах і їхньої комбінації (БІЧ/Ч, НРч). Використання більш складних ВІ, в тому числі G<sub>4</sub>, який враховує відбиття на всіх чотирьох ділянках спектру, не тільки не дає переваг в порівнянні з простими відношеннями, а навіть інколи поганшує результати (збільшення Р).

Порівняння табл. 1, 2 і 4 показує, що вплив підвищених доз азоту виявляється дещо краще при визначенні кількості пігментів, ніж за реакцією спектрального відображення. Мабуть, це закономірно, якщо врахувати, що спектральні характеристики являються вторинними по відношенню до пігментів. Але при індикації вірусного захворювання, яке впливає не лише на вміст пігментів, а і на морфологічні властивості листя, чутливість спектральних характеристик дещо вища, ніж пігментного апарату.

#### ВИСНОВКИ

Результати дослідів на томатах показали, що під впливом захворювання ВТМ-0 змінюється кількість пігментів, що відображається на оптичних характеристиках. Це підтверджує можливість використання дистанційних методів для діагностики стресового стану рослин. Найінформативнішою серед КСЯ і

комплексних вегетаційних індексів для розпізнання здорових і хворих рослин виявилась БІЧ-зона спектру.

Застосування спектральних характеристик сприяє виявленню хвороби на ранній стадії її розвитку, тобто під час інкубаційного періоду, що дає можливість вчасно провести захисні заходи.

1. Войнов О. А., Райлян В. Я., Девятаев О. С. Оценка состояния полей озимой пшеницы дистанционными методами // Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1989.—С. 51—54.
2. Войнов О. А., Райлян В. Я., Коробов Р. М. Некоторые статистические характеристики спектральных параметров растительного покрова озимой пшеницы // Тр. НПО «Планета».—1990.—Вып. 39.—С. 136—150.
3. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987.—248 с.
4. Дадыкин В. П., Беденко В. П. Внешние условия и усвоение растением лучистой энергии // Вестн. с.-х. науки.—1961.—№ 6.
5. Коубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
6. Лялько В. И., Колоша О. И. Метод ранней диагностики перезимовки озимых посевов с применением дистанционной инфракрасной съемки // Изв. АН СССР. Сер. биол.—1985.—№ 3.—С. 456—458.
7. Фадеев Ю. Н., Алимухамедов С. Н., Буданов В. Е. Аэрокосмический контроль фитосанитарного состояния агропарков // Вестн. с.-х. науки.—1984.—№ 3.—С. 129—134.
8. Шабала С. Н., Войнов О. А. Динамика физиологических характеристик растений — как элемент системы экологического мониторинга // Успехи соврем. биол.—1994.—114, вып. 2.—С. 144—159.
9. Шабала С. Н., Войнов О. А. и др. Критерии оценки эффективности действия гербицидов лабораторными экспресс-методами по переходным биоэлектрическим реакциям // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. — Киев: Аграрна наука, 1996.—С. 103—110.
10. Шульгин И. А., Клещин А. Ф. О корреляции между оптическими свойствами и содержанием хлорофилла в листьях растений // Докл. АН СССР.—1959.—125, № 6.—С. 1371—1373.
11. Basu P. et al. Estimation of pea yield loss from severe root rot and drought stress using aerial photographs and a loss conversion factor // Can. J. Plant Sci.—1978.—58, N 1.—P. 159—164.
12. Boatwright G. O., Whitehead V. S. Early warning and crop condition assessment research // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 54—64.
13. Bunnik J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relations with their morphological and optical properties. — Wageningen, 1978.—180 p.
14. Hilti Y. W., Ausmus B. S. Infrared photography of southern corn leaf blight // Phytopathology.—1972.—62, N 8.—P. 804.
15. Jackson R. D. Spectral indices in n. Space // Remote Sens. Environ.—1983.—13.—P. 409—421.
16. Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato R. J., Idso S. B. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 99—106.
17. Kanemasu E. T. Using ERTS-1 data systems to predict wheat disease severities and to estimate crop growth // IEEE Int. Conf. Commun. Minneapolis Minn., New. York.—1974.—P. 32D-1—32D-3.
18. Steven M. D. Reflection in the red and near infrared bands by healthy and stressed crops // Proc. 9th Ann. Conf. Remote sens. Soc.—1983, P. 152.
19. Wiegand C.L., Richardson A.J., Nixon P.R. Spectral components analysis: a bridge between spectral observations and agrometeorological crop models // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 83—89.

---

#### USE OF REMOTE SENSING METHODS FOR EVALUATING THE ACTION OF STRESS FACTORS ON VEGETATION

O. A. Voinov

We discuss the results of field investigations on the information content of the electromagnetic emission from tomato plants in the visible and near-IR spectral regions with the aim to evaluate their phytopathological condition. The near-IR region is shown to be more informative. Remote sensing methods allow the plant phytopathological state to be detected at early stages of plant development (before the appearance of visual symptoms).

УДК 533.6.011

# Проблемы научно-методического обеспечения расчета аэродинамики ракет-носителей

**В. П. Галинский, В. И. Тимошенко**

Інститут технічної механіки НАН України та НКА України, Дніпропетровськ

*Надійшла до редакції 23.03.98*

Обговорюються питання створення науково-методичного забезпечення розрахунку аерогазодинамічних характеристик ракет-носіїв. Приведена коротка характеристика методичного та програмного забезпечення, розробленого в ІТМ НАН України та НКА України для проведення аеродинамічних розрахунків ракет-носіїв у проектах АКРК «Світязь-1» та «Орль» космічної програми України.

Определение аэрогазодинамических параметров является неотъемлемой частью проектной отработки новых образцов ракет-носителей (РН). Необходимо знание как суммарных аэродинамических характеристик (АДХ), так и параметров, распределенных по поверхности РН, на всех участках траектории, начиная со старта и кончая сверх- и гиперзвуковым полетом. Получение достоверной информации о значениях газодинамических параметров требует большого объема экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, что в свою очередь вызывает необходимость создания и совершенствования методического обеспечения этих исследований. Возможности экспериментальной базы крайне ограничены. На экспериментальных установках можно моделировать лишь небольшую часть изменения таких определяющих параметров, как скорость движения, высота, состав газовой среды. В большей мере это относится к экспериментам в области сверх- и, особенно, трансзвуковых скоростей. Проблемы здесь связаны как с недостаточностью существующей экспериментальной базы, трудностями экономического характера ее развития и совершенствования, так и с относительно большими материальными затратами на проведение экспериментов даже на имеющихся экспериментальных установках.

© В. П. Галинский, В. И. Тимошенко, 1998

Расчетно-теоретические методы дают возможность получить более полную информацию при меньших временных и материальных затратах. Однако при этом возникают вопросы верификации расчетных методик, т. е. подтверждение достоверности результатов. Поэтому для определения аэрогазодинамических проектных параметров необходимо оптимальное сочетание расчетно-теоретических и экспериментальных методов. Экспериментальные исследования могут проводиться в ограниченном диапазоне изменения определяющих параметров, необходимом для подтверждения достоверности полученных аэрогазодинамических параметров. Основной объем информации при этом должен быть получен расчетными методами, эффективность которых существенным образом определяется уровнем развития численных методик определения суммарных и распределенных аэродинамических характеристик.

Разработка эффективного аэрогазодинамического обеспечения предусматривает проведение комплексных расчетно-теоретических исследований с целью:

- разработки основанных на конечно-разностном решении дифференциальных уравнений газовой динамики методов определения аэрогазодинамических параметров с учетом вязкости, от-

- рыва, интерференции элементов корпуса и крыльев, реальных физико-химических высокотемпературных процессов, сопровождающих сверх- и гиперзвуковое обтекание;
- разработки инженерных методов оперативного определения характеристик для использования их на ранних этапах проектирования и в оптимизационных задачах;
  - выдачи рекомендаций по оптимальным аэродинамическим формам;
  - составления систематизированных каталогов характеристик типовых форм.

Характерной особенностью создания программно-методического аэрогазодинамического обеспечения является то, что расчет проектных аэрогазодинамических параметров требует рассмотрения комплекса задач до-, транс- и сверхзвукового внешнего обтекания ракет, решаемых в приближениях невязкого и вязкого газа. Не все из этих направлений достаточно разработаны. Наиболее развитыми являются методы определения суммарных АДХ и распределенных параметров на сверхзвуковом участке траектории, хотя и в этой области есть нерешиенные проблемы, например расчет параметров на больших углах атаки при наличии развитых отрывных зон. Проблематичным является теоретическое определение параметров обтекания РН на трансзвуковых и дозвуковых скоростях. Необходимость рассмотрения большого количества задач выдвигает определенные требования к разработке математических моделей, к алгоритмическому и программному обеспечению, которые вытекают из компромисса между повышением точности численного моделирования и снижением затрат как на разработку методического и программного обеспечения (МПО), так и на проведение исследований [12].

Ниже приводится краткая характеристика МПО, разработанного в ИТМ НАН Украины и НКАУ с учетом этих требований, которое было использовано для проведения аэродинамических расчетов полных компоновок РН в проектах авиационных космических ракетных комплексов (АКРК) «Ориль» и «Святая-1», выполняемых в рамках космической программы Украины. Возможности созданного МПО иллюстрируются результатами решения задач пространственного сверхзвукового обтекания изолированных корпусов РН и полных компоновок РН, оснащенных крыльями, органами управления и стабилизации (ОУС). Сначала остановимся на методике определения АДХ изолированного корпуса РН, а затем — полных компоновок РН.

Существуют различные методики определения АДХ изолированных корпусов РН. Выбор расчетной методики определяется требованиями точно-

сти, зависящими от геометрических параметров формы тела: удлинения конической ( $\lambda_k = L_k/D$ ) и цилиндрической ( $\lambda_u = L_u/D$ ) частей, где  $L_k$  — длина конического наконечника,  $L_u$  — длина цилиндрического участка,  $D$  — диаметр цилиндра, а также условий полета (числа Маха  $M_\infty$  и угла атаки  $\alpha$ ). В настоящее время мы не располагаем достаточно эффективными численными методиками, которые бы позволяли получить АДХ корпусов РН при дозвуковых и трансзвуковых скоростях полета ( $M_\infty < 1$  и  $M_\infty \approx 1$ ). В этих условиях АДХ корпусов РН, как правило, определяются на основе обработки большого объема экспериментальных данных, имеющихся в различных КБ и представленных в виде таблиц и графиков зависимостей суммарных АДХ и распределений давления от параметров  $\lambda_k$ ,  $\lambda_u$ ,  $M_\infty$  и  $\alpha$ . Помимо этих данных существуют различные инженерные методики, построенные на обработке экспериментальных данных, позволяющие получать приближенные значения суммарных АДХ корпусов РН, например полуэмпирическая методика [14].

Хорошо отработаны методики определения распределенных и суммарных АДХ корпусов РН при сверхзвуковых скоростях полета ( $M_\infty > 1.5$ ). Согласно этим методикам при организации алгоритма расчета поля течения около изолированного корпуса РН разбивается на переднюю часть, размещенную вблизи носика корпуса, основную сверхзвуковую часть возмущенного потока, размещенную около боковой поверхности корпуса, и донную часть. Передняя область может быть как областью трансзвукового течения для затупленного наконечника, так и областью сверхзвукового конического течения для заостренного наконечника. Поле потока в передней области может рассчитываться по различным методикам в зависимости от вида наконечника. Для сферически затупленного наконечника обычно используется банк полей около сферы. Если затупленный наконечник несферической формы, то поле течения около него может быть рассчитано методом установления по времени [9]. При задании наконечника в виде острого конуса для расчета поля течения в передней области могут быть использованы два подхода. В первом подходе коническое поле течения около носика тела определяется методом установления по времени при численном интегрировании системы уравнений газовой динамики, записанной в сферической системе координат для конических переменных. Во втором подходе используется маршевое установление конического поля течения. Согласно этому подходу осуществляется маршевый расчет в цилиндриче-

ской системе координат поля течения около затупленного конуса того же угла полураствора, что и у острого конического наконечника тела. Поле устанавливается до тех пор, пока параметры в поле потока не перестанут изменяться при изменении маршевой координаты, направленной вдоль оси корпуса. Результаты расчетов показывают преимущество второго подхода, решение устанавливается быстрее в маршевом методе для затупленного конуса. Однако применение этого подхода имеет ограничение для больших углов атаки и полураствора конуса.

Необходимость расчета параметров течения в донной области корпуса тела обусловлена значительным влиянием донного давления на общее сопротивление РН. Расчет донного давления с учетом поля течения около корпуса РН и отклонения сопла от оси симметрии производится по методике [1], основанной на модели разделяющей линии тока.

Поле потока в основной области сверхзвукового течения рассчитывается пошаговым, маршевыми алгоритмами. Выбирается цилиндрическая система координат, с осью, направленной вдоль корпуса РН. Начало и ось цилиндрической системы координат вводятся таким образом, чтобы в поперечном сечении контур боковой поверхности корпуса РН был однозначной функцией меридионального угла  $\varphi$ . Форма поперечного сечения поверхности корпуса РН может быть произвольной. Это позволяет проводить расчеты обтекания корпусов РН по продольной и параллельной схемам. Ограничение на форму поверхности корпуса РН связано с гиперболичностью по маршевой переменной численно решаемой системы уравнений газовой динамики, т. е. с требованием отсутствия областей дозвукового течения вблизи боковой поверхности корпуса РН. Численное решение системы уравнений газовой динамики, описывающих течения невязкого газа, осуществляется по конечно-разностной схеме для счетной области, заключенной между заданной поверхностью корпуса РН и фронтом головного скачка [3, 10].

Этот подход позволяет получить приемлемые численные результаты только в определенном диапазоне удлинений цилиндрической части корпуса РН  $\lambda_{\text{ц}}$  и углов атаки  $\alpha$ . Из проведенного анализа результатов систематических численных расчетов изолированных корпусов РН следует, что АДХ изолированных корпусов РН могут быть получены с приемлемой точностью для умеренных сверхзвуковых скоростей полета  $M \approx 3$  при удлинениях цилиндрической части корпуса  $\lambda_{\text{ц}}$ , не превосходящих пяти калибров и углах атаки  $\alpha$  до  $10^\circ$ . Для

корпусов РН, имеющих удлинения  $\lambda_{\text{ц}}$  порядка десяти-двадцати калибров, не удается получить приемлемое численное решение. Это связано с тем, на подветренной стороне поверхности корпуса РН происходит срыв потока и образуется развитая область завихренного потока. При небольших углах атаки  $\alpha \leq 10^\circ$  уровень давления на подветренной стороне поверхности тела в области отрыва может слабо отличаться от давления на наветренной стороне, и поэтому даже незначительные погрешности в распределении давления могут приводить к значительным ошибкам в коэффициентах подъемной силы и момента тангажа, возрастающим с увеличением удлинения корпуса РН. Численное решение, получаемое в приближении невязкого потока, не позволяет учесть отличия, обусловленные срывом пограничного слоя с поверхности тела. Поэтому следует максимально использовать экспериментально полученную информацию. Имитация поперечного отрыва на корпусах большого удлинения позволяет расширить диапазон использования ПО для расчета АДХ корпусов РН в приближении невязкого газа.

Один из таких подходов базируется на ранее упомянутой полуэмпирической методике [14], построенной на обработке большого объема экспериментальных данных. Предполагается, что полуэмпирическая методика дает верное изменение производной коэффициента нормальной силы  $\dot{C}_{y_{\text{н}}}^z$  вдоль корпуса РН, которая на некотором удалении от носика тела практически не изменяется. Исходя из этого соображения, корректируются вычисления АДХ корпуса РН. Предполагается, что на наветренной стороне поверхности тела окружные распределения давления  $P(\varphi)$ , полученные в численном счете, соответствуют физике течения, а на подветренной — не соответствуют. Поэтому при вычислении АДХ окружные интегралы на поверхности тела представляются в виде суммы двух интегралов. Первого, вычисляемого на интервале  $0 \leq \varphi \leq \varphi_*$ , в котором используется распределение давления на поверхности тела, полученное в численном счете по конечно-разностной схеме, и второго, вычисляемого на интервале  $\varphi_* \leq \varphi \leq \pi$ , в котором задается некоторое постоянное значение давления  $\tilde{P}$ . Угловая координата  $\varphi_*(z)$  определяется в каждом сечении  $z = \text{const}$  таким образом, чтобы производная  $\dot{C}_y^z$ , получаемая при интегрировании численно полученного распределения давления, совпадала с  $\dot{C}_{y_{\text{н}}}^z$ . Существует большой произвол в задании значения  $\tilde{P}$  на подветренной стороне поверхности тела. Будем считать, что

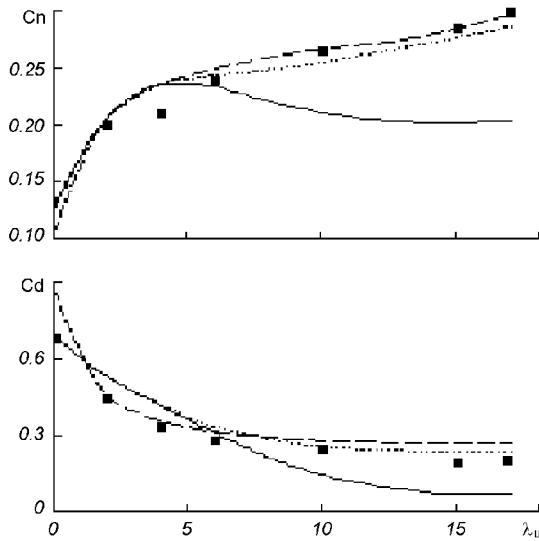


Рис. 1. Изменения коэффициента нормальной силы  $C_n$  и коэффициента центра давления  $C_d$  от удлинения цилиндрической части  $\lambda_u$  для двухсоставного тела конус-цилиндр с удлинением конического наконечника  $\lambda_k = 2.5$  при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 3$ , угле атаки  $\alpha = 4^\circ$ : квадратики — экспериментальные данные; точечная линия — приближенная методика; сплошная линия — численный расчет; штриховая линия — численный расчет с учетом значения  $C_{y_{\text{пп}}}$

$$\tilde{P} = q \cdot P_\infty + (1 - q)P_*,$$

где  $P_*$  — давление при  $\varphi = \varphi_*$ , а  $P_\infty$  — давление в окружающей среде. Параметр  $q$  изменяется в диапазоне от 0 до 1, при  $q = 0$   $\tilde{P} = P_*$ , и при  $q = 1$   $\tilde{P} = P_\infty$ . Обычно  $P_\infty > P_*$ , а иногда  $P_\infty \gg P_*$ , поэтому, задавая значение  $q = 0$ , мы завышаем значение коэффициента  $C_y$ , и наоборот, при  $q = 1$  — занижаем  $C_y$ .

Использование предложенного подхода позволяет повысить точность численного определения АДХ изолированных корпусов РН для сверхзвуковых чисел Маха набегающего потока (рис. 1). Однако при малых сверхзвуковых числах Маха  $M \approx 1.5$  не удается получить достоверных результатов по конечно-разностной схеме и использовать следует приближенные полуэмпирические методики.

При достаточно больших углах атаки  $\alpha$ , когда вблизи боковой поверхности тела формируется область с поперечным сверхзвуковым течением и уровень давления на наветренной стороне поверхности тела на порядок выше, чем на подветренной стороне, а изменениями в распределении давления на подветренной стороне можно пренебречь, рас-

пределенные параметры на наветренной стороне поверхности корпуса РН и суммарные АДХ могут быть получены с приемлемой точностью.

В этом случае АДХ тела рассчитываются по распределениям давления, полученным на участке поверхности тела  $0 \leq \varphi \leq \varphi_*$ , где  $\varphi = \varphi_*$  соответствует граничной меридиональной плоскости, находящейся с подветренной стороны поверхности тела, нормальная составляющая скорости на которой больше скорости звука. Поле течения в секторе  $\varphi_* \leq \varphi \leq \pi$  не рассчитывается, и давление в нем полагаем равным нулю. Результаты расчетов АДХ изолированного корпуса РН «Ориль», полученные с использованием такого подхода в диапазоне углов атаки  $10^\circ \leq \alpha \leq 24^\circ$ , приведены на рис. 2. Исключение из рассмотрения части поля течения, находящегося в отрывной зоне с подветренной стороны тела, позволяет получить достоверные результаты при маршевом расчете сверхзвукового обтекания корпусов РН под углами атаки до  $30^\circ$  в приближении невязкого газа.

Остановимся на вопросах численного расчета сверхзвукового невязкого обтекания РН, оснащенных крыльями и органами управления и стабилизации (ОУС). Сначала рассмотрим каким образом задается форма полной компоновки РН и условия функционирования ОУС. Будем считать, что любая компоновка РН представляется в виде корпуса, ОУС и крыльев, размещенных на нем. Крылья и ОУС отличаются формой и условиями функционирования. Под условиями функционирования ОУС будем понимать параметры, определяющие исходное положение органа или крыла на корпусе, задаваемое продольной координатой  $z_0^*$  и меридиональным углом  $\varphi_0$ , и угол  $\delta$  отклонения ОУС относительно его исходного положения. Всем ОУС и крыльям присваиваются определенные номера таким образом, чтобы они были упорядочены. Причем упорядочены они могут быть произвольным образом (например, снизу вверх по потоку). Затем для каждого органа задаются  $z_0^*$ ,  $\varphi_0$  и  $\delta$ , и тип его формы. ОУС или крылья одинаковой формы должны иметь одинаковое значение параметра типа формы из заданного набора форм.

Поверхность ОУС или крыла задается формой в плане и профилем. Для описания формы в плане используются декартовы координаты  $X$  и  $Z$  точек на передней и задней кромках в плоскости ОУС или крыла. Задание формы в плане оказывается достаточным для полного описания формы поверхности плоского крыла. При описании поверхности ОУС (крыла) не плоской формы требуется помимо формы в плане иметь возможность задавать форму

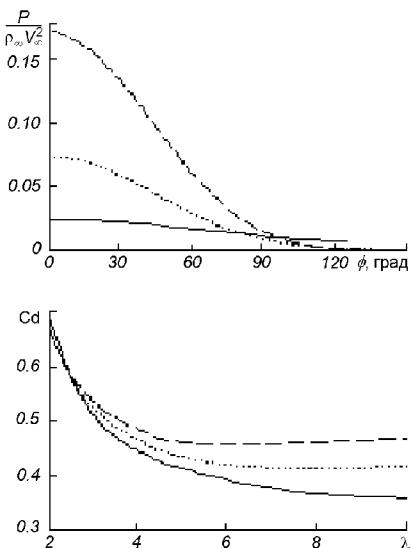


Рис. 2. Окружное распределение давления на поверхности тела в сечении  $\lambda = 8$  и изменение коэффициента центра давления изолированного корпуса РН АКРК «Ориль» при  $M_\infty = 6$  для разных углов атаки  $\alpha$ : сплошная линия —  $\alpha = 5^\circ$ ; точечная линия —  $\alpha = 15^\circ$ ; штриховая линия —  $\alpha = 24^\circ$

профиля. Для задания формы профиля используются два подхода: аналитическое и табличное задание. При аналитическом задании формы поверхности используются известные зависимости в поперечных сечениях  $Z = \text{const}$  для описания формы профиля. Неявное уравнение для формы поверхности ОУС (крыла) имеет вид  $f(X, Y, Z) = 0$ , его необходимо разрешить относительно  $Y$ . Это уравнение для формы продольного профиля крыла в поперечном сечении  $X = \text{const}$  можно записать таким образом

$$Y = f(X, * a_1(Z^*), a_2(Z^*), \dots, a_n(Z^*)),$$

где форма профиля крыла является явной функцией координаты  $X^* = X/X_{kp}$  и параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , изменяющихся вдоль оси  $Z$ . Здесь  $X_{kp}$  — координата  $X$  кромки крыла в текущем сечении  $Z = \text{const}$ . Количество параметров  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) и зависимости этих параметров от координаты  $Z^* = (Z - Z_{pk})/L_{pk}$  задаются для каждой конкретной формы крыла, где  $L_{pk} = (Z_{pk} - Z_{sk})$  — длина профиля крыла в сечении  $X = \text{const}$ ,  $Z_{pk}$  — координата  $Z$  точки на передней кромке профиля,  $Z_{sk}$  — координата  $Z$  точки на задней кромке профиля. В созданном программном обеспечении (ПО) реализованы симметричные сверхзвуковые профили крыла с острой передней кромкой — треугольный, четырехугольный и шестиугольный, которые зада-

ются следующими параметрами:

- максимальная относительная толщина  $\varepsilon$  профиля для треугольного профиля;
- относительные поперечная и продольная координаты  $\varepsilon, \xi$  угловой точки на профиле для четырехугольного профиля;
- относительные поперечная и продольная координаты первой и второй угловых точек  $\varepsilon_1, \xi_1, \varepsilon_2, \xi_2$  на профиле для шестиугольного профиля.

Значения параметров  $\varepsilon$  и  $\xi$  задаются в виде относительных величин длины  $Z^*$  продольного профиля в сечении  $X = \text{const}$ .

При табличном задании профиль может быть произвольного вида. В этом подходе для описания формы поверхности ОУС (крыла) вводится разбиение его опорными сечениями  $X_k = \text{const}$  ( $k = 1, \dots, K_x$ , где  $K_x$  — количество сечений разбиения), параллельными плоскости симметрии тела. Крыло рассекается сечениями  $X_k = \text{const}$  на части, начиная от корневой хорды крыла и заканчивая его вершиной. В каждом опорном сечении  $X_k = \text{const}$  задаются координаты  $Y_{k,i}$  и  $Z_{k,i}$  ( $i = 1, \dots, K_{yz}$ , где  $K_{yz}$  — количество опорных точек, задаваемых на профиле крыла) характерных точек на нижней и верхней сторонах поверхности крыла. Причем количество характерных точек на нижней и верхней сторонах поверхности крыла остается неизменным во всех опорных сечениях. Форма профиля крыла в точках поверхности крыла, лежащих в опорном сечении  $X_k = \text{const}$  между характерными точками или между опорными сечениями, вычисляется по формулам линейной интерполяции.

С учетом вышеуказанных представлений полных компоновок РН разработана методика расчета АДХ. Сущность методики расчета АДХ РН с ОУС, разработанной в соответствии с принципом функциональной независимости, состоит в следующем. Сложная комплексная задача разбивается на ряд более простых задач, для каждой из которых численно интегрируется система уравнений газовой динамики. Для решения комплексной задачи в зависимости от требований к точности расчета могут использоваться различные подходы. Наиболее широко применяется подход, в котором не учитывается интерференция корпуса и крыльев или ОУС. Сначала рассчитывается поле сверхзвукового течения около изолированного корпуса РН, а затем в поле течения, возмущенное этим корпусом, помещаются ОУС и крылья и определяется воздействие потока на них. Вдоль корпуса РН вводятся характерные области течения, в каждой из которых формулируется своя математическая задача. Расчет параметров потока в области, где располагаются ОУС или крылья, проводится по

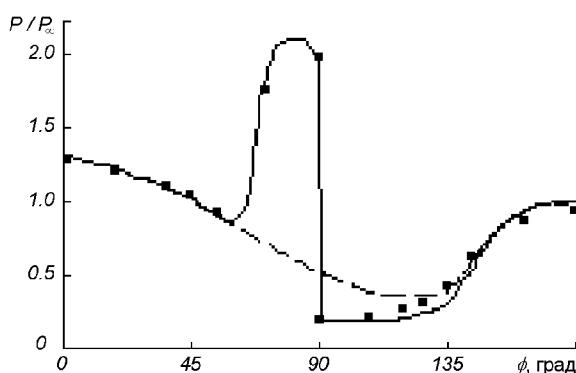


Рис. 3. Распределение давления на поверхности тела с оперением в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  при  $Z = 4.5$  для  $M_\infty = 3$ ,  $\alpha = 10^\circ$ : квадратики — эксперимент; сплошные линии — расчет; штриховые линии — расчет для изолированного корпуса

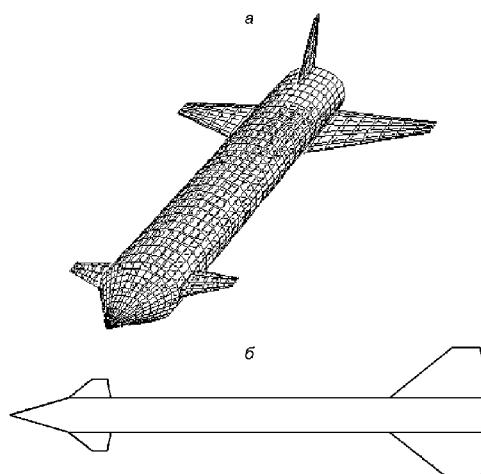


Рис. 4. Компоновка РН АКРК «Святая-1»: а — в изометрии; б — вид в плане

различным методикам, определяемым формой ОУС (крыла) и режимом его функционирования. Используется несколько подходов к расчету АДХ ОУС, которые приводятся ниже по мере усложнения.

В самом простом случае, когда требуется определить силовое воздействие потока на ОУС (крыло) и не предъявляется высокая точность к результатам расчетов, например, при проектной отработке, можно ограничиться точным расчетом поля течения около корпуса РН и рассчитывать АДХ ОУС приближенно по методу локального взаимодействия (МЛВ). Этот подход наиболее прост и может быть применен к ОУС произвольных форм. Сначала определяется поле возмущенного потока около изолированного корпуса РН. Затем рассматривается воздействие возмущенного потока на каждый ОУС, размещенный в рассматриваемой области, причем это воздействие не зависит от положения остальных органов. Для вычисления давления на поверхности ОУС используются два подхода: расчет по формулам Ньютона для местных параметров, возмущенных корпусом РН, либо наложение скачка или волны разрежения при повороте местного возмущенного потока в касательную к поверхности тела плоскость. Второй подход дает более адекватные результаты.

Более точные результаты дает использование точного численного решения уравнений газодинамики для расчета поля течения около ОУС. При таком подходе рассматривается обтекание изолированного ОУС сверхзвуковым потоком, возмущенным корпусом РН. Основное ограничение на получаемое решение состоит в требовании гиперболичности системы уравнений газодинамики, в силу

чего накладываются ограничения на формы рассчитываемых ОУС и условия их функционирования. Точность аэродинамического расчета ОУС увеличивается за счет учета влияния вязкости поля течения перед этими органами. Учет влияния вязкости производится с использованием методологии численного расчета ламинарного или турбулентного пограничного слоя на корпусе РН.

Следующий подход к повышению точности расчетов АДХ корпуса РН и АДХ ОУС состоит в учете их интерференции, когда рассматривается обтекание сверхзвуковым потоком одновременно корпуса РН и ОУС и крыльев, размещенных на нем. Используется многозонный метод (МЗМ) расчета, при котором внутренняя граница счетной области состоит из элементов поверхности корпуса, ОУС и крыльев в соответствующих маршевых сечениях, а в качестве внешней границы задается головной скачок. Счетная область в маршевом сечении разбивается на несколько зон. В этом подходе учитывается интерференция корпуса, ОУС и крыльев в процессе счета для каждого маршевого сечения. Основная сложность расчета таких течений состоит в том, что для их расчета должны использоваться различные алгоритмы, так как ОУС, крылья могут иметь существенно отличающиеся формы.

Используется две методики расчета полей течения около РН с ОУС и крыльями, которые зависят от относительной толщины ОУС и крыльев. Согласно первой методике предполагается, что ОУС (крыло) является достаточно тонким и его можно заменить плоским разрезом, лежащим в плоскости ОУС или крыла [13]. В этом случае используется вышеописанный МЗМ, и расчет поля течения около тонкого крыла ничем не отличается от расчета поля

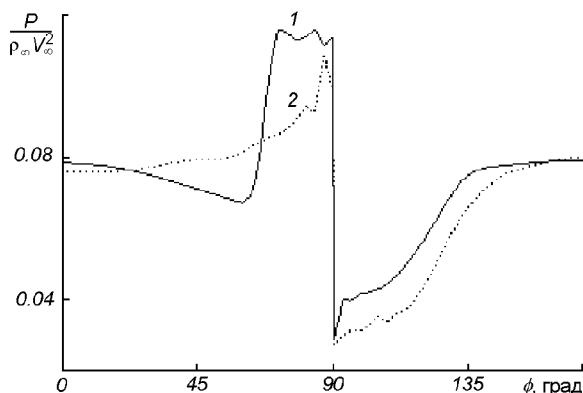


Рис. 5. Окружное распределение давления на поверхности РН АКРК «Святязь-1» в поперечном сечении  $\lambda = 9$  для крыла в положениях среднеплана и низкоплана при  $M_\infty = 3$ ,  $\alpha = 5^\circ$ : 1 — среднеплан; 2 — низкоплан

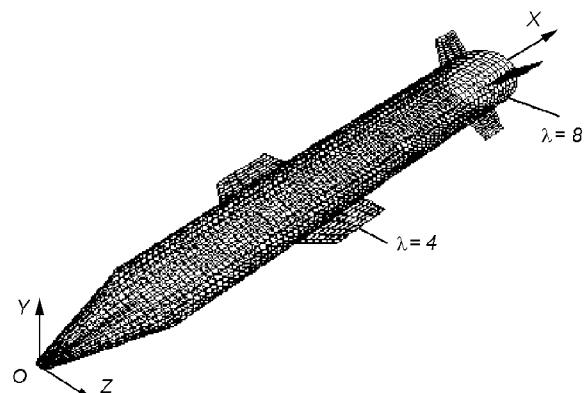


Рис. 6. Компоновка РН АКРК «Ориль»

течения около ОУС. Несущие, стабилизирующие и управляющие органы РН, как правило, достаточно тонкие и могут быть заменены плоскими элементами. Реальная форма профиля крыла или ОУС учитывается при постановке граничных условий и вычислении аэродинамических нагрузок, действующих на эти органы. Использование этого подхода позволяет значительно упростить численную реализацию задачи и повысить оперативность расчета, так как в этом случае количество ОУС и крыльев, размещенных на корпусе РН, практически не влияет на время счета. Используемая методика позволяет учесть взаимное влияние возмущений полей течения около корпуса РН, ОУС и крыльев независимо от их количества и места расположения на корпусе РН. При наличии нескольких органов на каком-либо участке поверхности корпуса РН увеличение времени счета обусловлено в основном стягиванием счетной сетки, которое необходимо использовать для увеличения разрешающей способности. Сравнения распределенных и суммарных АДХ оперенного тела, взятого из литературных источников [7], подтверждают достоверность результатов, получаемых с использованием разработанной методики (рис. 3).

Во втором подходе предполагается, что крыло является достаточно толстым. В этом случае поверхность крыла задается в качестве нижней границы счетной области (поверхности тела), а не границы между двумя счетными подобластями, как это делается в случае тонкого крыла [3, 4]. Нижняя граница счетной области строится в сечениях  $Z_k = \text{const}$  с учетом формы поверхности корпуса РН и крыла. Уравнения газовой динамики численно интегрируются в цилиндрической системе координат. Положение продольной оси цилиндрической

системы координат выбирается таким образом, чтобы контур поперечного сечения, состоящий из поверхности корпуса РН и крыла, являлся однозначной функцией меридионального угла  $\varphi$ . Ось цилиндрической системы координат, вводимой для расчета поля течения в случае толстого крыла, может быть параллельно смешена в плоскости симметрии тела относительно оси корпуса РН. Таким образом разработанные методики предполагают разные подходы к расчету полей течения на разных участках поверхности РН. Эти методики были использованы для численного определения аэродинамических характеристик ВКС «Буран» [4], РН АКРК «Святязь-1» и «Ориль». Остановимся на результатах расчетов сверхзвукового обтекания РН АКРК «Святязь-1» и «Ориль».

Корпус РН АКРК «Святязь-1» задается в виде острого конического наконечника, имеющего удлинение  $\lambda_k = 1.9$  и угол полураствора  $20^\circ$ , и цилиндрической поверхности с удлинением  $\lambda_u = 9.0$  (рис. 4). В хвостовой части поверхности корпуса размещены крылья, а для уменьшения запаса статической устойчивости за коническим наконечником установлены дестабилизаторы. Крылья и дестабилизаторы имеют трапециевидную форму с углом стреловидности передней кромки  $45^\circ$ , продольные профили задаются в виде 6-%-го симметричного профиля NACA-0006. Отношение площадей крыла и дестабилизатора в плане задается равным 6.5. Так как относительные толщины крыльев и дестабилизаторов малы, то можно считать, что они расположены в меридиональных плоскостях  $\varphi = 90^\circ$ ,  $270^\circ$  (вектор скорости лежит в плоскости симметрии тела). С учетом такого допущения были проведены расчеты аэродинамических характеристик отдельных элементов и полной компоновки РН на

сверхзвуковом участке полета. Было исследовано влияние положения крыльев (средне- и низкоплан) и формы крыльев (в плане и профиля) на аэродинамические характеристики полной компоновки. На рис. 5 приведено окружное распределение давления на поверхности корпуса в поперечном сечении  $Z_k = \text{const}$  (сечении на крыле) при  $M = 3$  угле атаки  $\alpha = 5^\circ$ . Линия 1 соответствует крылу в положении среднеплана, а 2 — низкоплана. Размещение крыла в положении низкоплана приводит к уменьшению запаса статической устойчивости компоновки. На примере 6 % профиля крыла показано, что изменение формы профиля крыла может приводить к 10 % изменениям аэродинамических характеристик полной компоновки РН. Замена крыла плоской пластиной дает минимальные значения коэффициентов нормальной силы  $C_n$  и момента  $C_m$  для одной и той же формы крыла в плане.

Результаты аэродинамических расчетов компоновки РН АКРК «Ориль» (рис. 6) приведены на рис. 7, 8. Аэродинамическая компоновка включает два аэродинамических руля, расположенных в меридиональных плоскостях  $\varphi = 90, 270^\circ$  на боковой поверхности при  $\lambda = 4$ , и четыре аэродинамических стабилизатора в меридиональных плоскостях  $\varphi = 45, 135, 225, 315^\circ$  на хвостовой части при  $\lambda = 8$ . Окружные изменения давления на поверхности корпуса РН показаны на рис. 7, где сплошная линия соответствует поперечному сечению  $\lambda = 4$ , точечная —  $\lambda = 6$ , штриховая —  $\lambda = 8$ . На рис. 8 показаны поля изобар в трех поперечных сечениях  $Z_k = \text{const}$  ( $\lambda = 4$  соответствует сечению, в котором

находятся стабилизаторы;  $\lambda = 6$  — сечению на цилиндрической части поверхности корпуса РН, лежащей между стабилизаторами и рулями;  $\lambda = 8$  — сечению, в котором находятся рули). Хорошо видна эволюция внутреннего скачка, который сначала формируется на наветренной стороне потока вблизи руля при  $\lambda = 4$ , а затем распространяется вниз по потоку. Там же хорошо виден скачок, который формируется при  $\lambda = 8$  вблизи стабилизатора, размещенного на наветренной стороне корпуса РН ( $\varphi = 45^\circ$ ).

Таким образом, имеющееся МПО позволяет проводить расчеты сверхзвукового обтекания различных компоновок РН, оснащенных ОУС и крыльями. При этом могут быть получены суммарные

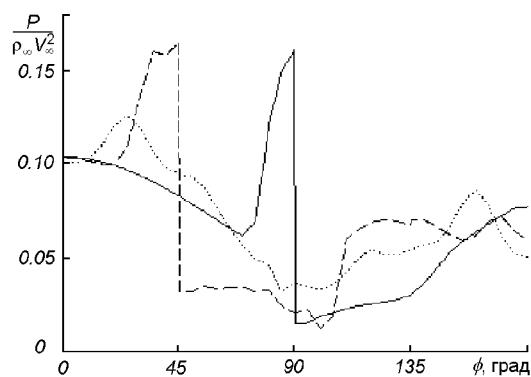


Рис. 7. Окружные распределения давления на поверхности корпуса РН АКРК «Ориль» при  $M_\infty = 3$ ,  $\alpha = 5^\circ$  в сечениях: сплошная линия —  $\lambda = 4$ ; пунктирная линия —  $\lambda = 6$ ; штриховая линия —  $\lambda = 8$

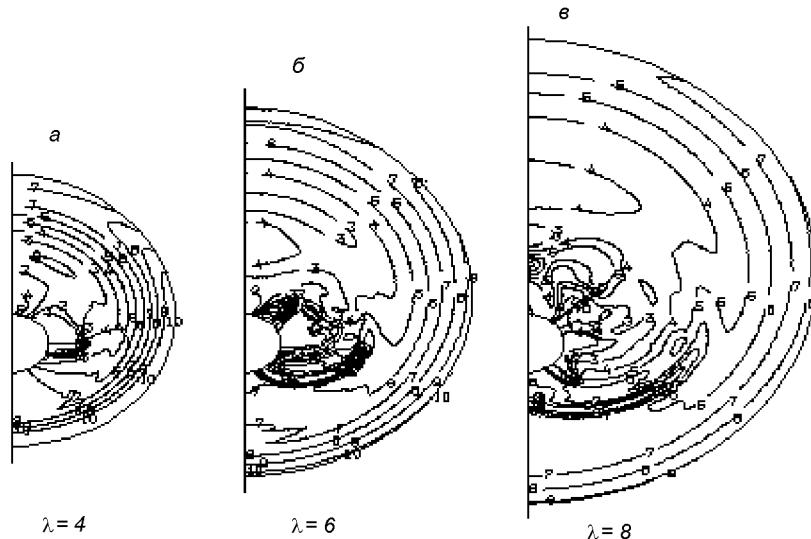


Рис. 8. Изобары в поле потока около РН АКРК «Ориль» при  $M_\infty = 3$ ,  $\alpha = 5^\circ$  в сечениях:  $\lambda = 4, 6, 8$

АДХ отдельных составляющих и полной компоновки РН, распределения параметров на поверхности корпуса РН и ОУС и в любой точке поля потока.

1. Белоцерковец И. С., Тимошенко В. И., Филипповская Л. М. Влияние неравномерности внешнего потока и угла отклонения сопла на донное давление за осесимметричным телом с одиночной сверхзвуковой струей // Изв. ВУЗов. Авиационная техника.—1990.—№ 1.—С. 34—36.
2. Воронова Г. Г., Лиманский А. В., Тимошенко В. И. Параметрическое исследование аэродинамического качества затупленных конусов // Уч. зап. Центр. аэро-гидродинам. ин-та.—1991.—22, № 1.—С. 77—81.
3. Галинский В. П., Тимошенко В. И. Результаты численного исследования сверхзвукового обтекания тел с крыльями переменной стреловидности // Прикладные вопросы аэrodинамики летательных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 77—81.
4. Галинский В. П., Тимошенко В. И. Результаты численного исследования сверхзвукового обтекания тел с крыльями переменной стреловидности // Аэротермодинамика воздушно-космических систем: Сб. докл. школы-семинара ЦАГИ. — М.: Изд-во ЦАГИ, 1992.—Часть II. —С. 116—131.
5. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.—400 с.
6. Кушнир Г. Г., Тимошенко В. И. Параметрическое исследование аэродинамического сопротивления и качества биэллиптических затупленных конусов // Изв. ВУЗов. Авиационная техника.—1989.—№ 2.—С. 67—68.
7. Розин А. В. Исследование обтекания оперенного тела сверхзвуковым потоком газа // Аэродинамика входа тел в атмосферу планет. — М.: Изд-во МГУ, 1983.—С. 17—23.
8. Тимошенко В. И. Пакет прикладных программ для комплексного решения задач сверхзвукового обтекания осесимметричных тел // Комплексы программ математической физики. — Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО АН ССР, 1980.—С. 52—60.
9. Тимошенко В. И., Белоцерковец И. С. Численное моделирование сверхзвукового пространственного обтекания тупых тел // Гидрогазодинамика и тепломассообмен летательных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 53—58.
10. Тимошенко В. И., Галинский В. П. Оперативный расчет пространственного сверхзвукового обтекания тел, близких к осесимметричным // Изв. ВУЗов. Авиационная техника.—1991.—№ 4.—С. 22—26.
11. Тимошенко В. И., Галинский В. П., Белоцерковец И. С. Проблемы научно-методического аэродинамического сопровождения разработок ракет-носителей // Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения: Тез. и аннотации докл. методич. конф. — М.: Изд-во ЦНИИМаш, 1996.—С. 96—97.
12. Тимошенко В. И., Лиманский А. В. Технология численного решения на ЭВМ задач газовой динамики. — Киев.: Наук. думка, 1985.—231 с.
13. Тимошенко В. И., Филипповская Л. М. Численное исследование особенностей сверхзвукового обтекания кругового конуса с плоскими крыльями потоком невязкого газа // Изв. ВУЗов. Авиационная техника.—1989.—№ 1.—С. 53—55.
14. Moore F. G., Devan L., Hymer T. New semiempirical method for computing nonlinear missile aerodynamics // J. Spacecraft and Rockets.—1993.—30, N 6.—P. 697—706.

#### PROBLEMS IN DEVELOPING SCIENTIFIC METHODS FOR CALCULATING AERODYNAMIC PARAMETERS OF BOOST VEHICLES

V. P. Galinskiy, V. I. Timoshenko

We discuss the problems that arise in the development of scientific methods for calculating aerodynamic characteristics of boost vehicles. We describe briefly the methodology and the software developed at the Institute of Engineering Mechanics NASU and the National Space Agency of Ukraine for aerodynamic calculations of boost vehicles in the «Svityaz-1» and «Oril» projects of the space program of Ukraine.

УДК 528.27:621.37/39

## Чувствительность гравиинерциальных датчиков

Е. И. Крючков

Інститут космічних досліджень НАН України, НКА України, Київ

*Надійшла до редакції 09.04.98*

Стаття присвячена розробці інерціальних датчиків для розв'язання задач гравіметрії, сейсмографії та інерціальної навігації. Розглянуті деякі датчики різного принципу дії. Головну увагу приділено кріогенним датчикам, які зараз мають найвищу чутливість. Проведено аналіз чутливості широко відомого кріогенного датчика Пейка та кріогенного датчика нового типу, розробленого в ІКД. Цей датчик знаходитьться в стані лабораторних досліджень.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной гравиметрии является создание градиентометра на движущихся объектах и использование новых физических принципов при создании гравиметрических приборов [2]. Космическая гравиметрия предоставляет заманчивую возможность изучения неоднородностей гравитационного поля Земли из космоса с помощью гравитационного градиентометра. Требуемая чувствительность градиентометра должна составлять  $10^{-12} \div 10^{-13}$  м/с<sup>2</sup> при базе градиентометра 1 м. Градиентометров с такой высокой чувствительностью на сегодняшний день нет.

Достигнутая точность измерения ускорения свободного падения  $g$  на поверхности Земли с относительной погрешностью  $10^{-8}$  при времени усреднения выходного сигнала датчика до нескольких минут не удовлетворяет требованиям сегодняшнего дня. Например, экспериментальная проверка стабильности положения центра масс Земли, измерения смещений полюсов Земли, измерение гравитационной постоянной требуют обеспечения чувствительности гравиметрических датчиков на уровне ( $10^{-10} \div 10^{-12}$ ) $g$  и выше.

Для повышения чувствительности гравиметрических приборов необходимо использовать новые физические принципы.

© Е. И. Крючков, 1998

Напомним основные принципы построения гравиинерциальной аппаратуры.

Название «гравиинерциальный» означает, что датчик измеряет ускорения гравитационного поля и инерционные (кажущиеся) ускорения. Пространственные градиенты гравитационных ускорений, являющиеся вторыми производными гравитационного потенциала, измеряются гравитационными градиентометрами. Градиентометр содержит две чувствительные массы, разнесенные на определенное расстояние друг от друга, называемые базой. По принципу работы гравиинерционные датчики разделяются на статические и динамические.

Основной частью статического гравиинерциального датчика является чувствительная масса (ЧМ), связанная с корпусом датчика элементами жесткости и трения.

Информация о воздействии гравитационных либо инерционных ускорений, неразделимых вследствие принципа эквивалентности, содержится в изменении координаты или скорости ЧМ относительно корпуса прибора.

В других датчиках, работа которых основана на динамическом методе, ускорения регистрируются путем измерения частоты, периода колебаний либо по измерениям пройденного пути и времени.

Гравиинерциальные датчики разделяют на гравиметры и гравитационные градиентометры, измеря-

ющие гравитационное поле, и на акселерометры и сейсмографы, измеряющие инерционные ускорения.

Отличия между гравиметрами, акселерометрами и сейсмодатчиками заключаются в классе точности, в частотном диапазоне измеряемых ускорений и месте предполагаемого использования (стационарный наземный или мобильный вариант), что определяет их различные массо-габаритные показатели (см. подробнее в [1]).

Основной показатель качества гравиинерциальных датчиков — это их способность определять минимально обнаружимые перемещения ЧМ или время с требуемой точностью на фоне собственных шумов прибора.

Для оценки такой способности обычно рассчитывают чувствительность, которая определяется внутренними неустранимыми шумами прибора — так называемую потенциальную чувствительность.

#### ДАТЧИКИ, РАБОТАЮЩИЕ ПРИ ОБЫЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исторически первыми создавались датчики, работающие при обычных температурах. За более чем 30-летний период времени были созданы и успешно работают достаточно большое количество гравиинерциальных датчиков различных типов и конструкций.

Из этой гравиметрической аппаратуры можно выделить:

1. Баллистические гравиметры, измеряющие абсолютную величину  $g$  с относительной погрешностью  $10^{-8} \div 10^{-9}$  [1]. В этих гравиметрах применяется динамический метод свободного падения тел. Высокая точность измерения  $g$  достигается за счет использования рубидиевого стандарта частоты, стабильность которого составляет  $10^{-10}$  за 10 сут и оптического интерференционного метода измерения длины пути падения с погрешностью  $10^{-9}$  измеряемой длины. Перспективы повышения эффективности использования баллистических гравиметров связаны не только с дальнейшим увеличением точности, но и с созданием портативного абсолютного гравиметра, применение которого существенно расширит области его использования.

2. Кварцевые статические гравиметры Всесоюзного научно-исследовательского института геофизики АН СССР. Эти гравиметры обеспечивают среднюю квадратичную погрешность  $10^{-8} g$  [1].

3. Широко известны за рубежом гравиметры Лакоста и Ромберга. Они также обеспечивают в среднем точность измерения  $10^{-8} g$  [1].

Приведенные выше точности достигаются при усреднении выходного сигнала датчика до нескольких минут.

В датчиках, работающих при обычных температурах, практически достигнут предел чувствительности и стабильности работы, связанный с собственными шумами.

Достигнутая точность измерения  $g$  с погрешностью  $\pm 10^{-8} g$  при заметном времени усреднения перестает удовлетворять требованиям сегодняшнего дня.

#### КРИОГЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Одним из путей повышения чувствительности гравиинерциальных датчиков является использование низких и сверхнизких температур. Применение этих температур позволяет не только снизить уровень тепловых шумов и увеличить стабильность работы датчиков, но и использовать необычные физические эффекты и явления. Наиболее интересными из них являются сверхпроводимость, эффект Браунбека, эффекты «магнитной потенциальной ямы» (МПЯ) и Джозефсона.

Эффект Браунбека состоит в том, что при использовании диамагнитных тел возможен устойчивый подвес свободной массы. Поскольку диамагнетизм присущ односвязным сверхпроводящим образцам (сплошное тело, «без дырок»), конструктивно один элемент диамагнитного неконтактного подвеса выполняется, как правило, в виде неподвижной сверхпроводящей катушки, а чувствительная масса (ЧМ) делается в форме осесимметричного сверхпроводящего тела, геометрические формы которого повторяют поверхность сверхпроводящей катушки подвеса. ЧМ располагается над неподвижной катушкой, чтобы сила тяжести компенсировалась силой диамагнитного отталкивания.

Еще более широкие возможности для создания устойчивого подвеса ЧМ открывает эффект МПЯ [3]. Исследования магнитного взаимодействия между сверхпроводящими токонесущими катушками привели к обнаружению нового характера поведения силы магнитного взаимодействия (рис. 1).

Известно, что притяжение и отталкивание двух постоянных магнитов или электромагнитов с увеличением расстояния между ними монотонно ослабевает, а при уменьшении расстояния — монотонно увеличивается. При эффекте МПЯ магниты взаимодействуют существенно иным образом: при уменьшении расстояния между ними притяжение вначале усиливается, но, дойдя до некоторого значения, ослабевает и, пройдя через нулевое значе-

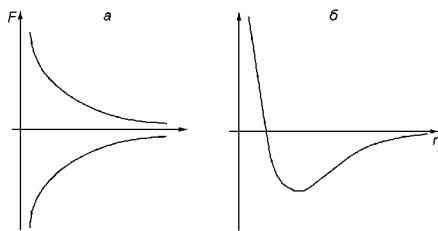


Рис. 1. Характер силы взаимодействия между осесимметричными магнитами в зависимости от расстояния между ними:  $a$  — взаимодействие между обычными магнитами;  $b$  — МПЯ-взаимодействие. Положительным значениям силы  $F$  соответствует отталкивание, отрицательным — притяжение

ние, переходит в отталкивание. Это свойство эквивалентно тому, что потенциальная энергия магнитного взаимодействия как функция расстояния имеет минимум (существует потенциальная яма), причем точке минимума энергии отвечают нуль магнитной силы. Фактически реализуется магнитный эквивалент обычной механической пружины. На основе этого магнитного эквивалента пружины возможно создание разнообразных вариантов неконтактного подвеса свободного тела для экспериментов по обнаружению малых сил.

Эффект МПЯ был теоретически открыт и экспериментально подтвержден в Институте кибернетики НАНУ. В настоящее время эти работы продолжаются в Институте космических исследований НАНУ и НКАУ.

В основу работы сверхпроводящего квантового интерферометрического датчика (СКВИД) положен эффект Джозефсона. Использование СКВИДа в регистраторе смещений ЧМ позволило сразу получить потенциальную чувствительность, минимум на порядок превышающую лучшие достижения обычного приборостроения. Это реализовано в конструкции криогенного статического гравиметрического датчика, получившая название по многочисленным публикациям как датчик Пейка.

#### ДАТЧИК ПЕЙКА

На базе конструкции Пейка разработаны акселерометры и гравитационные градиентометры с предположительным их использованием как в земных условиях, так и в космосе [4].

Рассмотрим базовую модель датчика Пейка, измеряющую гравиинерциальные ускорения. Роль ЧМ в данной конструкции выполняет сверхпроводящая пластина, взвешенная на специальных пружинах (рис. 2). По обеим сторонам на расстоянии  $x_0$  от ЧМ расположены две плоские спиральные

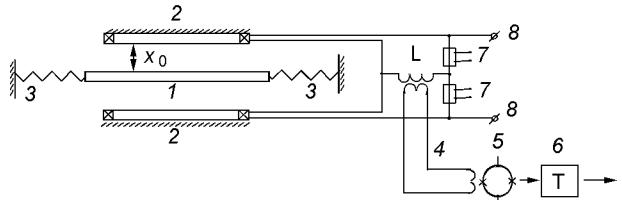


Рис. 2. Датчик Пейка:  $1$  — ЧМ;  $2$  — спиральные катушки (вид сбоку);  $3$  — пружины;  $4$  — трансформатор потока;  $5$  — СКВИД;  $6$  — усредняющее звено;  $7$  — тепловые ключи;  $8$  — токовводы

катушки, параллельно соединенные между собой. Между точками их соединения включена катушка с индуктивностью  $L$ , связанная через трансформатор потока со СКВИДом. В сверхпроводящих плоских катушках циркулирует незатухающий ток  $I_0$ . Смещения ЧМ под воздействием внешних ускорений модулируют вследствие эффекта Мейсснера индуктивности спиральных катушек, что приводит к изменениям магнитного потока в индуктивности  $L$ . Этот сигнал регистрируется СКВИДом. На рис. 2 также показаны токовводы и тепловые ключи для ввода в спиральные катушки тока  $I_0$ . Датчик имеет вертикальную ось чувствительности. На выходе датчика находится усредняющее звено.

Принципиально неустранимыми шумами здесь, как и во многих других криогенных датчиках, являются тепловой броуновский шум ЧМ и широкополосный шум СКВИДа.

Автором проведен расчет коэффициента передачи энергии от ЧМ ко входу СКВИДа и получена следующая относительно простая формула для оценки потенциальной чувствительности с учетом конечного времени  $T$  усреднения выходного сигнала СКВИДа и с учетом соотношения на выходе сигнал/шум = 1:

$$\Delta g_{\min} \approx \frac{2\omega_0^2 x_0 \sqrt{E_f}}{k I_0 \sqrt{L}} \frac{1}{\sqrt{T}}. \quad (1)$$

Здесь  $E_f$  — энергетическая спектральная плотность шумов СКВИДа, приведенная к его входной катушке; для лучших коммерческих СКВИДов эта величина лежит в пределах  $4 \cdot 10^{-28} \div 5 \cdot 10^{-29}$  Дж/Гц;  $k$  — коэффициент связи между индуктивностью  $L$  и трансформатором потока;  $\omega_0$  — круговая частота собственных колебаний ЧМ.

Шум СКВИДа в датчике Пейка превышает броуновский шум ЧМ, поэтому при расчете чувствительности брался во внимание только шум СКВИДа.

Выражение (1) получено для низкочастотных ускорений  $\Delta g$ , частота которых гораздо меньше частоты  $\omega_0$ .

Для средних значений параметров датчика

$$E_f = 10^{-29} \text{ Дж/Гц}; \quad \omega_0 = 2\pi \cdot 20 \text{ Гц}; \quad x_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$I_0 = 1 \text{ А}; \quad k = 0.8; \quad L = 1 \text{ мкГн}$$

из (1) получаем следующее значение потенциальной чувствительности

$$\Delta g_{\min} \approx 5 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\sqrt{T}} \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

которое удовлетворительно согласуется с данными других публикаций.

Подвес ЧМ на механических пружинах может быть причиной нестабильности показаний прибора из-за усталости материала пружин, влияния упругого последействия, зависимости свойств материала от температуры. При реализации столь высокой чувствительности исключение любых мешающих факторов имеет особенно важное значение.

Уменьшение  $\omega_0$  с целью увеличения чувствительности приводит к сужению динамического диапазона измерений. Уменьшение  $x_0$  и увеличение  $I_0$  и  $L$  для той же цели увеличивает обратное влияние системы СКВИД-регистрации на подвес ЧМ, что приводит к появлению дополнительной «динамической» жесткости, т. е. к увеличению  $\omega_0$ .

Из изложенного выше вытекает, что разработчики датчика Пейка при достижении требуемой чувствительности должны заботиться о других, не менее важных параметрах прибора.

#### ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МПЯ

Простейшая модель МПЯ датчика содержит две сверхпроводящие катушки с элементами ввода подвеса в рабочий режим и СКВИД с трансформатором потока (рис. 3). Верхняя катушка, закрепленная неподвижно, имеет удаленный виток, индуктивно связанный через трансформатор потока со

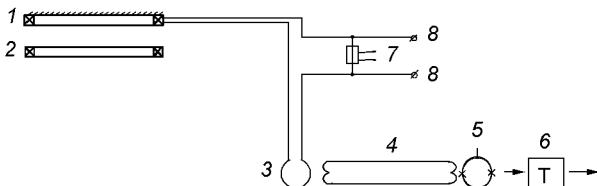


Рис. 3. Датчик на эффекте МПЯ: 1 — неподвижная катушка (вид сбоку); 2 — свободно левитирующая катушка (ЧМ); 3 — удаленный виток; 4 — трансформатор потока; 5 — СКВИД; 6 — усредняющее звено; 7 — тепловой ключ; 8 — тоководы

входом СКВИДа. Другая катушка, являющаяся ЧМ, свободно левитирует под закрепленной катушкой. На рис. 3 также показаны тоководы и тепловой ключ для ввода МПЯ подвеса в рабочий режим. Датчик имеет вертикальную ось чувствительности. На выходе включено усредняющее звено.

С точки зрения регистрации смещений ЧМ МПЯ подвес обладает весьма полезным свойством: поскольку ток в неподвижной катушке является однозначной функцией положения ЧМ, то подвес сам непосредственно регистрирует смещения взвешенной катушки. Вследствие этого в МПЯ-датчике отсутствует отдельный блок преобразователя смещений ЧМ в сигнал, способный измеряться СКВИДом [6]. Это значительно упрощает конструкцию.

Коэффициент передачи энергии от ЧМ ко входу СКВИДа в этом датчике в среднем на 2 порядка больше, чем в датчике Пейка. Вследствие этого броуновский тепловой шум ЧМ на входе СКВИДа превышает собственный шум СКВИДа, приведенный к его входной катушке.

Потенциальную чувствительность МПЯ-датчика можно оценить учитывая только броуновский шум ЧМ.

Автором получена формула (3) для оценки потенциальной чувствительности МПЯ-датчика при соотношении на выходе сигнал/шум = 1, с учетом конечного времени  $T$  усреднения выходного сигнала, и при условии высокодобротного МПЯ-подвеса ( $Q \gg \omega_0 T$ , где  $Q$  — добротность подвеса):

$$\Delta g_{\min} \approx \sqrt{\frac{2K_B T}{m}} \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Здесь  $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град — постоянная Больцмана;  $T \approx 4$  К — температура жидкого гелия;  $m$  — масса ЧМ,  $m \approx 0.3$  кг.

Выражение (3) справедливо при измерении низкочастотных ускорений, частота изменения которых гораздо меньше частоты  $\omega_0$ .

При указанных выше величинах получаем:

$$\Delta g_{\min} \approx 1.6 \cdot 10^{-11} \frac{1}{T} \text{ м/с}^2. \quad (4)$$

За счет большей связи ЧМ со входом СКВИДа расчетная потенциальная чувствительность МПЯ-датчика превосходит чувствительность датчика Пейка.

Видно, что  $\Delta g$  в выражении (3) более сильно зависит от времени усреднения  $T$ , чем в выражении (1).

Для увеличения чувствительности нужно увеличивать  $T$ . Экспериментальные возможности уста-

новки по проверке нагрузочной способности МПЯ-подвеса позволяли подвешивать массы до 80 кг. Основное ограничение на увеличение  $m$  накладывают масса-габаритные показатели создаваемого прибора.

К настоящему времени проведены успешные лабораторные испытания основных узлов МПЯ-датчика: МПЯ-подвес, система СКВИД-регистрации токового сигнала, блок АЦП, что позволяет надеяться на работоспособность всего макета датчика в целом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что применение высокочувствительных датчиков позволяет решить ряд существующих проблем современной гравиметрии.

В наземных условиях демонстрация высокой чувствительности (2), (4) требует тщательного устранения или компенсации мешающих факторов. Самой значительной помехой являются естественные и промышленные колебания земной поверхности.

Поэтому наиболее предпочтительным является создание высокочувствительных датчиков, пригодных для работы на подвижном основании. Использование таких датчиков на спутниках, самолетах, кораблях и других подвижных объектах позволит осуществлять не только глобальное изучение гравитационного поля Земли с требуемыми высокими точностями, но и существенно повысить точность и автономность инерциальной навигации за счет непрерывного учета влияния уклонений отвесной линии.

Можно осуществлять навигацию по гравитационному полю и построить на гравитационных градиентометрах и акселерометрах (без использования гироскопов, создание которых с необходимой высокой точностью задача весьма сложная) гравиинер-

циальную и инерциальную навигационные системы [5]. При этом акселерометр определяет вектора линейных и угловых ускорений, действующих на платформу градиентометра. Такой акселерометр в комбинации с градиентометром является обзорной гравиинерциальной системой.

Автор благодарит О. К. Черемных за сделанные замечания и С. Д. Живило за помощь в оформлении статьи.

1. Грушинский Н. П. Основы гравиметрии. — М.: Наука, 1983.—361 с.
2. Исследования гравитационного поля и природных ресурсов Земли космическими средствами: Тез. докл. Всесоюз. конф. — Львов, 1984.—137 с.
3. Михалевич В. С., Козорез В. В., Рашкован В. М. и др. «Магнитная потенциальная яма» — эффект стабилизации сверхпроводящих динамических систем. — Киев: Наук. думка, 1991.—336 с.
4. Chan H. A., Paik H. J., Moody M. V. Superconducting gravity gradiometer for space and terrestrial applications // J. Appl. Phys.—1991.—60, N 12.—P. 4308–4315.
5. Chan H. A., Paik H. J., et al. Superconducting techniques for gravity survey and inertial navigation // IEEE Trans. Magn.—1985.—21, N 2.—P. 411—414.
6. Kruchkov E. I. One approach to magnetic levitation and precision acceleration measurement under superconductivity conditions // IEEE Trans. Appl. Supercond.—1996.—6, N 4.—P. 157—159.

---

## SENSITIVITY OF INERTIAL-GRAVITATIONAL INSTRUMENTS

**E. I. Kryuchkov**

The paper describes some devices based on various operating principles to be used in gravimetry, seismography, and in inertial navigation systems. Major improvements in sensitivity and drift can be made in inertial-gravitational instruments by utilizing favorable properties of materials available at low temperatures. Therefore most attention is concentrated on superconducting instruments. We propose a new superconductive gravity instrument based on the «magnetic potential well» effect.

УДК 629.78+550.388.1

# Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях: експеримент Г60С

М. А. Леонов

Київський університет ім. Тараса Шевченка, Київ

Надійшла до редакції 17.09.97

Детально описується малогабаритний бортовий прискорювач електронів для ракетного експерименту Г60С — одна із реалізацій схеми прискорювача на ємісних накопичувачах. Описано деякі основні технічні характеристики та робота в ході експерименту. Приведено короткий аналіз режиму роботи в ході експерименту.

## 1. ВСТУП

Мета даної статті — показати кількісні характеристики та якісні особливості прискорювача електронів на накопичувачах-ємностях [4, 5] на конкретному прикладі льотного зразка прискорювача для висотного магнітосферного експерименту Г60С [1, 3, 8]. Серед ракетних експериментів саме цей заслуговує особливої уваги, оскільки є унікальним за деякими характеристиками та результатами [10].

Основними задачами експерименту Г60С були вивчення потенціалу тіла, яке інжектує пучок електронів, його вольт-амперної характеристики, а також вивчення пучково-плазмового розряду, який виникає при взаємодії інжектованого пучка електронів зі штучно випущеним струменем нейтрального газу або з нейтральним газом атмосфери на малих висотах.

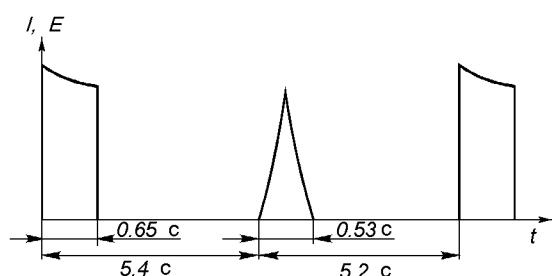
## 2. ЦИКЛОГРАМА ІНЖЕКЦІЇ

Циклограмма інжекції є відправним моментом для проектування прискорювача будь-якого типу взагалі. Якщо характеристики прискорювача прямого живлення визначаються головним чином струмом та енергією інжекції, то характеристики прискорю-

вача на накопичувачах залежать ще й від тривалостей імпульсів інжекції та пауз, від їх співвідношення (скважності), від форми імпульсів. Прискорювач на накопичувачах більш чутливий до циклограмми інжекції. Вона може повністю визначати не тільки характеристики, але й доцільність застосування прискорювача такого типу.

В експерименті Г60С циклограмма інжекції була дуже простою (рис. 1) і складалась із «прямокутного» та трикутного імпульсів, що чергувались між собою. Проміжок часу від початку прямокутного імпульсу до початку трикутного становив 5.4 с, а від початку трикутного імпульсу до початку прямокутного — 5.2 с.

Трикутний імпульс великої тривалості ( $\tau_{\text{інжT}} \approx 0.53$  с) зі зміною напруги від 0 до 5.5 кВ був



потрібний в першу чергу для детальних вимірювань вольт-амперної характеристики космічного апарату, який інжектує електрони. Передній фронт, в якому прискорююча напруга на гарматі плавно зростала від 0 до 5.5 кВ, мав тривалість 0.25 с. Задній фронт, в якому напруга спадала, тривав 0.28 с.

«Прямокутний» імпульс інжекції ( $\tau_{\text{інжП}} \approx 0.65$  с) мав вершину, яка зменшувалась від 6.3 кВ, 0.5 А на початку до 4.5 кВ, 0.32 А в кінці його. Вершина дещо відрізнялась від експоненти [5], і тому розряд ємнісного накопичувача визначався нелінійністю вольт-амперної характеристики гармати.Хоча горизонтальна вершина в прямокутному імпульсі була б зручною для вивчення ППР, але імпульс з монотонно падаючою вершиною додатково давав можливість просканувати вольт-амперну характеристику апарату при енергіях більших, ніж у трикутному імпульсі.

Відносно велика тривалість імпульсів інжекції була продиктована, по-перше, потребами вивчення пучково-плазмового розряду, який перед запалюванням потребував стадії попереднього накопичення плазми [2]. По-друге, бажано було врахувати можливий вплив процесів у середовищі з усіма можливими часовими константами при вимірах вольт-амперної характеристики інжектуючого апарату.

### 3. СХЕМА

Прискорювач був виконаний за варіантом схеми, показаним на рис. 2. Ескізний розрахунок прискорювача зроблено на основі загальних міркувань, викладених у роботах [4, 5].

Джерелом енергії для прискорення електронного пучка та живлення електронної гармати ЕГ є високовольтний ємнісний накопичувач  $\epsilon$ Н. Електронна гармата ЕГ ввімкнена послідовно в коло розряду ємнісного накопичувача  $\epsilon$ Н за допомогою лампи Л, яка може служити або простим ключем (під час інжекції «прямокутного» імпульсу), або аналоговим регулюючим елементом (під час інжекції трикутного імпульсу).

З метою стабілізації кута розбіжності інжектованого пучка  $\alpha_r$  при будь-якому миттєвому значенні прискорюючої напруги на катоді гармати  $U_{\text{кГ}}$  під час інжекції (особливо в трикутному імпульсі інжекції) застосовувалось електромагнітне фокусування інжектованого електронного пучка.

Прогноз очікуваних екстремальних режимів роботи прискорювача спирається на результати ракетних експериментів, наприклад, [9], та лаборатор-

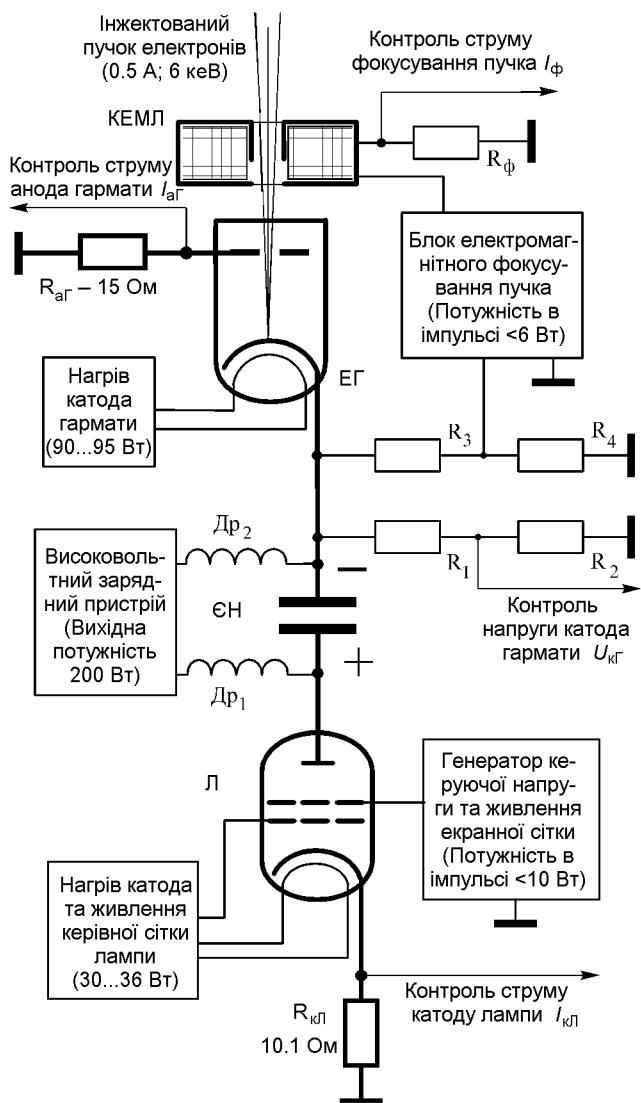


Рис. 2. Принципова схема прискорювача електронів на ємнісному накопичувачі в магнітосферному експерименті Г60С: високовольтне коло розряду накопичувача виділене жирною лінією; накопичувач  $\epsilon$ Н типу К41И-7, 100 мкФ, 5 кВ; характеристики інших вузлів приведені у тексті

ного моделювання експерименту Г60С у вакуум-камері [2]. Імовірність пробоїв та газового розряду в гарматі за оцінками була невисокою. Отже, можна було не ускладнювати прискорювач схемою захисту лампи при коротких замиканнях в гарматі.

### 4. КОНСТРУКЦІЯ

Прискорювач складався з чотирьох блоків: ємнісного накопичувача  $\epsilon$ Н, блока електронної гар-

мати ЕГ, блока фокусування пучка БФ, та блока електроніки БЕ-2.

Блоки ЕГ та БФ знаходились на приладовій платформі зовні й зверху гермоконтейнера. Інші блоки знаходились всередині гермоконтейнера.

Високовольтним ємнісним накопичувачем для прискорювача був вибраний високовольтний імпульсний конденсатор типу К-41И-7 з паперовим діелектриком. Ємність конденсатора — 100 мікрофарад, номінальна робоча напруга — 5 кВ, випробувальна напруга становить 12.5 кВ. Маса конденсатора не перевищувала 15 кг, габарити  $410 \times 120 \times 170$  мм. Для отримання кращого коефіцієнта корисної дії всього прискорювача конденсатори К-41И-7 відбиралися за якістю діелектрика на мінімум величини струмів стікання.

Високовольтний зарядний пристрій здійснював перетворення напруги на частоті 2.5 кГц. Вихідна напруга холостого ходу в льотному зразку прискорювача становила 8.8 кВ. Випрямлена висока напруга подавалась на виводи ємнісного накопичувача через дроселі  $D_{p1}$  та  $D_{p2}$  (рис. 2) із міркувань, викладених в [5].

Регулюючим елементом в колі прискорюючої напруги був вибраний пролітний пентод типу ПП1-0.5/10 серійного виробництва. Він здатен пропускати струм до 500...550 мА при анодній напрузі до 10 кВ.

Розжарення катода лампи вимагало напруги 12.6 В при струмі 2.5 А.

Транзисторний перетворювач нагріву катода лампи працював на частоті 10 кГц з коефіцієнтом корисної дії 95 %. Змінна напруга 12.6 В одночасно використовувалась (після її трикратного помноження та випрямлення) для створення постійного негативного зміщення приблизно -35 В на керівній сітці.

Відів тепла з анода лампи здійснювався шляхом теплопередачі через ізолятор на металевий корпус блока БЕ-2.

Після лабораторних проробок макета прискорювача було вибрано керування струмом анода  $I_{aL}$  цієї лампи по екранній сітці позитивною напругою  $U_{eep} = 0...1300$  В при струмах екранної сітки  $I_{eep}$  до 1...3 мА з приблизно прямою пропорційною залежністю струму лампи  $I_{aL} = I_{aL}(U_{eep})$ .

Діодна електронна гармата була виготовлена у ВЕІ АН СРСР [3], але вона врешті-решт потребувала модернізації (див. п. 5). Льотний зразок гармати інжектував струм  $I_{kF} = 0.5...0.6$  А при напрузі  $U_{kF} = 6...7$  кВ. При цьому катод прямого розжарення 1 (рис. 3) із вольфрамово-ренієвого дроту, звичного в архімедову спіраль, вимагав потужності підігріву до 90...95 Вт ( $U = 6.3...6.5$  В та  $I =$

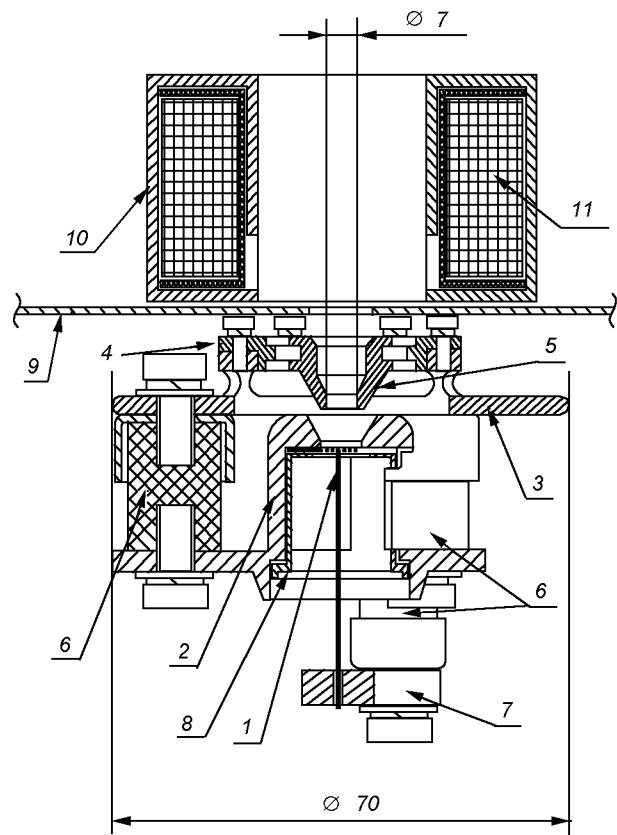


Рис. 3. Конструкція електронної гармати: 1 — катод прямого розжарення із вольфрамово-ренієвого дроту, 2 — фокусуючий електрод, 3, 4 — анодні фланці, 5 — анодна втулка, 6 — керамічні ізолятори, 7 — шина-затискувач одного виводу катодної спіралі, 8 — циліндр-затискувач другого виводу катодної спіралі, 9 — верхній диск захисного кожуха гармати, 10 — магнітопровід, 11 — обмотка катушки фокусуючої електромагнітної лінзи

$= 14.0...14.5$  А при опорі у гарячому стані 0.45...0.47 Ом).

Гармата була встановлена в захисному кожусі — металевому циліндрі з нержавіючої сталі діаметром 145 мм та висотою 220 мм, який кріпився на зовнішній приладовій платформі на гермофланцеві. Анод гармати складався із двох фланців 3, 4 (рис. 3) з нержавіючої сталі та з молібденової анодної втулки 5 з прохідним отвором діаметром 7 мм для інжектованого пучка.

Катодно-підігрівний вузол кріпився на ізоляторах 6 із кераміки 22ХС. Анод кріпився зсередини захисного циліндра до диска 9 верхньої основи захисного циліндра знизу.

Диск був ізольований від корпуса та під'єднувався до нього через резистор  $R_{aF}$  (рис. 2). Зверху

на дискові кріпилась коротка електромагнітна лінза 10, 11 (рис. 3) для фокусування інжектованого пучка. Всередині захисного кожуха за гарматою розміщувались високопотенціальний трансформатор розжарення катода, а також два високовольтних дільники ( $R_1 R_2$  — для телеметричного контролю прискорюючої напруги та  $R_3 R_4$  — для блока фокусування пучка, див. рис. 2).

Маса блока електронної гармати ЕГ з захисним кожухом, електромагнітною лінзою КЕМЛ, високопотенціальним трансформатором нагріву катода та високовольтними дільниками становила 800 г.

Джерело розжарення катода гармати — транзисторний перетворювач, який працював на частоті 15 кГц з коефіцієнтом корисної дії 95 %. Для захисту вихідного каскаду джерела, а також для регулювання струму розжарення застосувалась подвійна трансформація, тобто катод під'єднувався до вихідного трансформатора не прямо, а через проміжний трансформатор з проміжною напругою 90 В.

Система електромагнітного фокусування пучка конструктивно складалась із короткої електромагнітної лінзи (КЕМЛ), блока електроніки (БФ) та високовольтного дільника напруги  $R_3 R_4$  (рис. 2). КЕМЛ підтримувала напруженість магнітного поля пропорційно кореню квадратному від прискорюючої напруги за допомогою блока БФ. Магнітопровід КЕМЛ (10 на рис. 3) мав форму циліндра з зовнішнім діаметром 60 мм, висотою 35 мм, внутрішнім діаметром (отвір для електронного пучка) 30 мм, висотою магнітного зазору біля 10 мм. Товщина магнітопроводу 1 мм, матеріал — низьковуглецева відпалена сталь. КЕМЛ була розташована поблизу анода гармати біля виходу електронного пучка. Опір котушки КЕМЛ (11 на рис. 3) становив 33 Ом. При енергії пучка 7 кеВ максимальний струм фокусування становив 245 мА. Блок електроніки БФ мав розміри  $70 \times 50 \times 130$  мм та масу 0.66 кг, енергоспоживання в імпульсі менше 6 Вт.

Льотний зразок прискорювача в результаті застосування електромагнітного фокусування пучка мав струм аноду гармати  $\leq 7$  мА при напрузі до 7—8 кВ. Кут розбіжності був стабілізований з точністю 10 % для будь-якого фіксованого значення в інтервалі 0—30° при будь-якій за формою та амплітудою прискорюючої напрузі, спектр якої лежав у смузі частот приблизно 0...40 Гц. Ці характеристики не були високими. Вони визначались якістю виконання блока БФ та магнітної лінзи й могли бути поліпшені в разі потреби.

## 5. ЛАБОРАТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ

Характеристики перших технологічних зразків гармат, як показали лабораторні випробування, були незадовільні. Кут розбіжності  $\alpha_r$  та струм аноду  $I_{ag}$  в простій діодній гарматі з електростатичним фокусуванням пучка пов'язані таким чином, що покращення одного параметра призводить до погіршення другого.

При задовільних струмах анода (при діаметрі анодної діафрагми 8 мм) кут розбіжності на протязі інжекції змінювався в неприйнятно великих межах. Так, за час інжекції прямокутного імпульсу кут розбіжності змінювався на 5—10°, а за час інжекції трикутного — приблизно на 30—40°. При застосуванні такої гармати була б не тільки занадто складна кутова та часова функціональна залежність густини  $n_e = n_e(U_{kG}, x, y, z)$  електронів інжектованого пучка, але й велика невизначеність в інтерпретації результатів експерименту.

Вказана дилема була вирішена шляхом застосування електромагнітного фокусування пучка. Для цього струм анода доводився (шляхом виготовлення нового анода) до рівня 5...10 мА при напрузі 5...7 кВ, а розбіжність пучка, яка збільшувалась до 60—70°, компенсувалась застосуванням електромагнітного фокусування.

Під час випробувань гармати в екстремальних режимах у вакуум-камері при тиску, вище від  $3 \cdot 10^{-4}$  торр\*, у проміжку анод—катод гармати часто спостерігались одиночні високовольтні пробої та газовий розряд. Під'єднання дроселів Д<sub>р1</sub> та Д<sub>р2</sub> (рис. 2) на виході ВВЗП забезпечило надійний захист ВВЗП навіть при інтенсивних пробоях при навмисні піднятому до  $10^{-3}$  торр тиску у вакуум-камері. Після роботи при коротких замиканнях та газовому розряді в гарматі температура лампи не перевищувала допустимої (180 °C).

В передстартових випробуваннях та каліброках прискорювача у вакуум-камері був виставлений режим роботи блока БФ. При цьому кут розбіжності  $\alpha_r \approx 3^\circ \pm 1^\circ$  підтримувався з найбільшою точністю на вершині прямокутного імпульсу та на фронтах трикутного. Аналогова електронна схема добування квадратного кореня із миттєвого значення прискорюючої напруги  $U_{kG}$  була здатна забезпечити точність 1 % в інтервалі зміни напруги на 3...4 порядки.

Прямі виміри зарядного струму  $i_{sap}$  у високовольтному колі при стаціонарному режимі під час випробувань при напрузі  $U_{kG} 6...8$  кВ давали вели-

\* 1 торр = 133.322 Па

чину  $i_{\text{sap}}$  в межах 32...38 мА. При цьому блок ВВЗП при напрузі енергоджерела 30 В споживав струм 11...13 А. Потужність нагріву катода гармати не перевищувала 100 Вт.

## 6. ЕКСПЕРИМЕНТ Г60С

Підготовка та проведення експерименту Г60С велась силами лабораторії активних експериментів Інституту космічних досліджень СРСР. Експеримент був проведений 18 вересня 1981 р. в умовах ранньої ночі у Волгоградській області з полігона Капустин Яр за допомогою ракети «Вертикаль». Загальна тривалість експерименту з моменту старту і до моменту падіння контейнера на поверхню Землі становила 23 хв 50 с. Максимальна висота підйому 1514 км.

Опис комплексу наукової апаратури та окремих результатів експерименту можна знайти в роботах [6—8, 11].

Вся наукова апаратура була змонтована на герметичному контейнері, який відокремлювався від ракетного двигуна в кінці активної ділянки траєкторії. Форма гермоконтейнера — близька до сферичної з діаметром поперечного перерізу 1.2 м та висотою 1.8 м. Контейнер був заповнений азотом під тиском 2 атм. Положення контейнера в просторі було стабілізоване по трьох осях за допомогою гіроскопічного пристрою (коливання  $< 1^\circ$ ). Поздовжня вісь контейнера була орієнтована приблизно в місцевий зеніт.

Особливість траєкторії в тому, що вона близька до прямовисної лінії. Точка падіння знаходилась всього на 60 км на схід від точки старту. Приблизно половина траєкторії по висоті знаходилась у тіні Землі, а верхня її частина — освітлювалась Сонцем. Горизонтальна складова швидкості була дуже мала (0.144 км/с). Вертикальна складова швидкості на висотах 100 км наближалась до 4.7 км/с. Кут між місцевою вертикальлю та геомагнітною лінією на висотах від 0 до 1500 км знаходився в межах приблизно від  $24^\circ$  до  $26^\circ$ .

Інжекція електронів проводилась в напрямку місцевого зеніту. В цьому ж напрямку повинен був проводитись і напуск нейтрального газу з інжектора газу. Отже, пітч-кут інжекції на протязі всього експерименту становив  $156^\circ$ — $154^\circ$ .

Старт ракети відбувся о 21 год 59 хв 58.308 с за московським літнім часом. Приблизно на 18-й с стартового часу було ввімкнено схему нагріву катода регулюючої лампи. В кінці активної ділянки траєкторії на висоті 168 км ( $T_{\text{cr}} = 127.56$  с) проведено відокремлення контейнера від ракетного дви-

гуна і стабілізацію положення осей контейнера в просторі. На 145-й с на висоті 245 км ввімкнено живлення високовольтного зарядного пристрою, який почав заряджати ємнісний накопичувач. Одночасно ввімкнено розжарення катода гармати.

На 150-й с на висоті 267 км ввімкнено таймерний пристрій, який почав керувати роботою прискорювача електронів по циклограмі експерименту. Всього за час експерименту було інжектовано 240 імпульсів.

Перший імпульс інжекції, здійснений на 151-й с стартового часу на висоті 271 км висхідної ділянки траєкторії через 6 с після ввімкнення ВВЗП і джерела розжарення гармати, був прямокутної форми та мав малу потужність. Його невисокі максимальні параметри  $U_{\text{кГ}} \approx 4$  кВ та  $I_{\text{кГ}} \approx 0.3$  А зумовлені тим, що ємнісний накопичувач ще не встиг достатньо зарядитись.

На 170-й с стартового часу на висоті 365 км поступила команда на ввімкнення інжектора нейтрального газу. Чітко виражені ефекти, які б свідчили про нормальну його роботу, не спостерігались. Ale на висотах 1390...1340 км нисхідної ділянки траєкторії на протязі 4 імпульсів інжекції зарестровані особливості, які можна пояснити спонтанним спрацюванням інжектора газу (див. п. 7).

В інтервалі висот 867...945 км висхідної ділянки траєкторії ( $T_{\text{cr}} = 314...341$  с) за даними фотометрів ДФ-1 та ДФ-2 контейнер, перетинаючи напівтінь, виходить із тіні Землі на сонце.

Максимальної висоти 1514 км контейнер досягає на 757.5-й с стартового часу.

В інтервалі висот 1437...1293 км нисхідної ділянки траєкторії ( $T_{\text{cr}} = 912...1022$  с) спостерігаються швидкі, нерегулярні зміни в сигналах лічильників Гейгера, вимірювача потенціалу контейнера, а також повільні зміни сигналів іонізаційного манометра в паузах між інжекціями.

В інтервалі часу  $T_{\text{cr}} = 1123...1155$  с на висотах 1070...990 км нисхідної ділянки траєкторії (згідно з даними фотометрів ДФ-1 та ДФ-2), контейнер, перетинаючи напівтінь, занурюється в тінь Землі.

Останній 240-й імпульс інжекції був трикутним за формулою. Він здійснювався на висоті 87 км і фактично був не інжекцією, а газовим розрядом в гарматі. На висоті 68 км ( $T_{\text{cr}} = 1405.5$  с) телеметрія взагалі перестає поступати з борту на наземний пункт, оскільки контейнер починає руйнуватись в атмосфері.

Параметри інжекції на протязі експерименту в залежності від висоти контейнера ілюструються рис. 4 та рис. 5. Після ввімкнення високовольтного зарядного пристрою та початку інжекції прискорювач виходить протягом 40 с на стаціонарний режим.

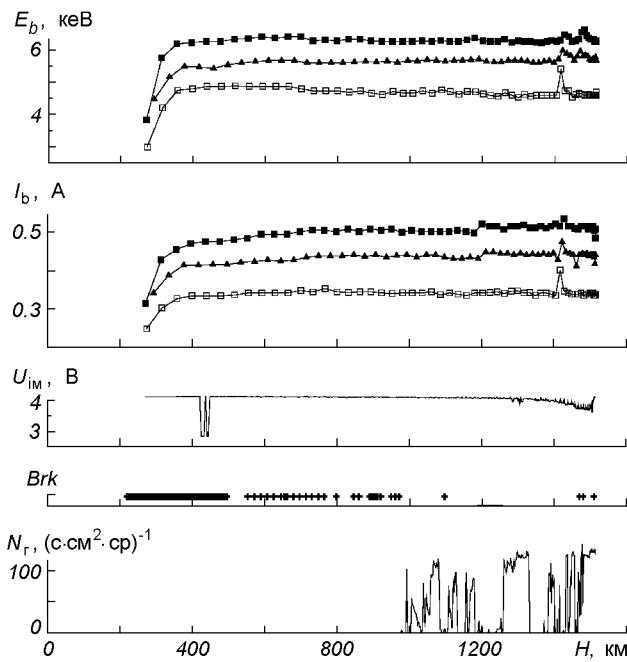


Рис. 4. Параметри інжекції в залежності від висоти контейнера на висхідній ділянці траєкторії. Для прямокутного імпульсу інжекції приведено енергію  $E_b$  та струм  $I_b$  пучка як для моментів початку (позначені чорними квадратами), так і моментів кінця імпульсу (позначені світлими квадратами). Для трикутного імпульсу — тільки енергію  $E_b$  та струм  $I_b$  в момент максимуму (позначені чорними трикутниками).  $U_{im}$  — напруга одного із сигналів іонізаційного вакуумметра (не відображає точно тиск нейтрального газу); на графіку  $Brk$  значком «+» позначені моменти, коли були зареєстровані високовольтні пробої в електростатичних аналізаторах приладу «Ушба»;  $N_r$  — потік часток, зареєстрований горизонтальним лічильником Гейгера в паузах між імпульсами інжекції

Після інжекції імпульсу № 7 ( $T_{cr} = 181$  с,  $H = 396$  км) параметри інжектованих імпульсів стабілізувались.

Усередині за весь експеримент параметри інжекції становили: в прямокутному імпульсі, на його початку — струм 495 мА, енергія 6.2 кеВ; наприкінці імпульсу — струм 320 мА, енергія 4.5 кеВ; тривалість імпульсу 0.65 с; в трикутному, на вершині імпульсу — максимальний струм 440 мА, максимальна енергія 5.5 кеВ; загальна тривалість імпульсу 0.53 с (на протязі 0.23 с відбувалось нарощання струму й енергії з нульових значень до максимальних, а потім на протязі 0.30 с плавне падіння до нуля).

Інжекція трикутного імпульсу відбувалась в середньому через  $T_{pt} = 5.4$  с після початку інжекції прямокутного, а інжекція наступного прямокутного імпульсу — через  $T_{pt} = 5.2$  с після початку трикутного.

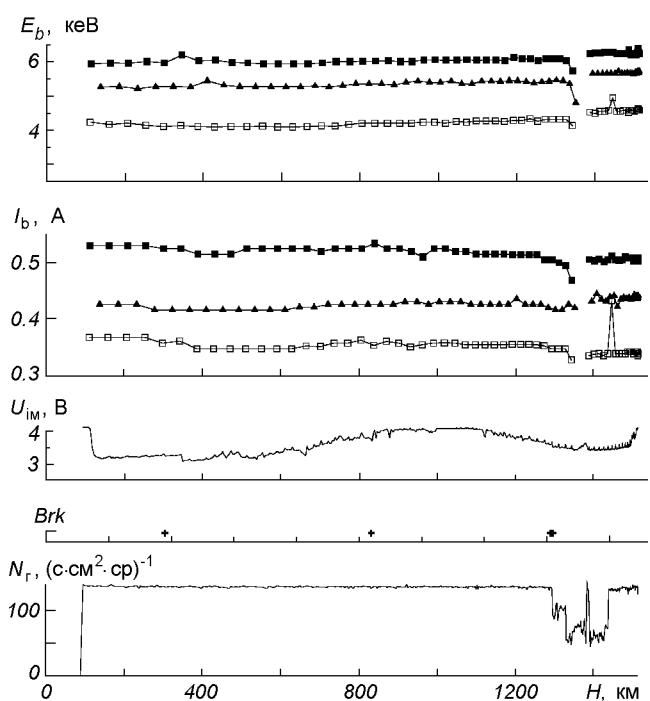


Рис. 5. Параметри інжекції в залежності від висоти контейнера на північній ділянці траєкторії. Позначення ті ж самі, що й на рис. 4

Кут розбіжності інжектованого пучка контролювався непрямим методом по напрузі  $U_\phi$  на електромагнітній лінзі. Типова форма цієї напруги свідчила про нормальнє функціонування системи фокусування пучка. Отже, кут розбіжності був незмінним  $\alpha_r \approx 3^\circ \pm 1^\circ$ , яким він був встановлений під час лабораторних випробувань.

## 7. ВІДХИЛЕННЯ В РОБОТІ ПІД ЧАС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Прискорювач працював стабільно на протязі всього експерименту. При зміні фізичних умов навколо контейнера спостерігались відхилення від нормальної інжекції. Реакція схеми прискорювача на ці відхилення була такою, як і очікувалось. Відхилення становлять інтерес, оскільки вони ілюструють динамічні властивості прискорювача та здатність тримати навантаження тільки завдяки лампі, без застосування спеціальних схем захисту від перевантаження.

Телеметричні дані від прискорювача та інших приладів свідчать, що після відокремлення контейнера від ракетного двигуна в гарматі часто реєструються короткочасні високовольтні пробої, аналогічні тим, що спостерігались в лабораторній ваку-

ум-камері. В цей час іде процес найбільш інтенсивного виділення газу з контейнера і ракетного двигуна, який ще не віддалився від контейнера на велику відстань.

На північній ділянці траєкторії всередині інтервалу 965...986 с на висотах 1390...1343 км в чотирьох імпульсах інжекції 156...159 зареєстровані відхилення параметрів інжектованих електронних пучків від значень, що стабілізувались. Спостерігаються флюктуації великої амплітуди всіх параметрів, що телеметрються, — струму катода  $I_{\text{кГ}}$  і анода  $I_{\text{аГ}}$  гармати, прискорюючої напруги  $U_{\text{кГ}}$  та напруги на магнітній лінзі фокусування пучка  $U_{\phi}$ . Струм анода в окремі моменти досягає величини струму катода гармати, тобто  $I_{\text{аГ}} \approx I_{\text{кГ}}$ , що означає замикання або газовий розряд в гарматі. Поведінка цих параметрів у часі подібна до тієї, що спостерігалася у лабораторній вакуум-камері під час появи нестабільного зворотного іонного пучка, який каналізується всередині інжектованого електронного пучка через проміжок «анод—катод» гармати.

Частота пробоїв високої напруги в електростатичних аналізаторах спектрометра електронів «Ушба» (графік  $Brk$  на рис. 4—5) корелює з сигналом від вакуумметра.

Потік електронів  $N_r$ , що реєструвався одним із лічильників Гейгера, після апогею майже весь час був вищим від максимального для приладу значення. На північній ділянці «зашкала» потоку  $N_r$  не спостерігався лише на протязі 110 с в інтервалі висот 1437...1293 км ( $T_{\text{cr}} = 912...1022$  с). Майже точно в середині цього інтервалу в чотирьох інжекціях (№ 156...159) від прискорювача зареєстровано форми сигналів, які є типовими для газового розряду в гарматі або зворотного іонного пучка, який каналізується всередині інжектованого електронного пучка в бік гармати.

Аналіз даних та їх зіставлення дають підставу схилятись до висновку, що всі відхилення в роботі прискорювача зумовлені наявністю нейтрального газу поблизу контейнера. Якісна поведінка приведених на рис. 4—5 характеристик ( $N_r$ ,  $Brk$ ,  $U_{\text{im}}$ ) корелює з частотою та тривалістю пробоїв у електронній гарматі.

Імовірно, що нейтральна мікроатмосфера поблизу контейнера на самому початку експерименту створювалася сильним виділенням газу з ракетного двигуна, який ще не встиг віддалитись від контейнера. Пізніше — в міру збільшення відстані від контейнера до двигуна — зростає роль виділення нейтрального газу із самого контейнера.

Ослаблення потоку  $N_r$  на лічильник Гейгера (висоти 1437...1293 км) та раптове збільшення тиску нейтрального газу поблизу контейнера на північній

ділянці траєкторії в інтервалі часу  $T_{\text{cr}} = 965...986$  с (висоти 1390...1343 км, за даними іонізаційного манометра) найбільш вірогідно були викликані спонтанним спрацюванням інжектора нейтрального газу. Таке могло бути тому, що замерзле на початку експерименту сопло інжектора газу розігрілось після виходу з тіні Землі на сонце, але електропневмоклапан камери низького тиску перестав функціонувати нормально. Оцінка можливого часу випуску всього газу із інжектора нейтрального газу майже точно збігається з тривалістю ослаблення потоку  $N_r$ . Для розмірів утвореної при цьому хмари газу  $L$  оцінки близькі по порядку до довжини  $\lambda$  пробігу електронів. Тому ослаблення потоку електронів  $N_r \propto e^{-L/\lambda}$  приблизно в  $e = 2.7$  раза, яке можна бачити на графіку рис. 5 в інтервалі висот 1390...1343 км північній ділянки траєкторії, можна пояснити розсіянням у хмарі нейтрального газу.

Форми відповідних імпульсів інжекції та їх спектр також найкраще узгоджуються з некерованим спонтанним випуском газу із інжектора газу. Отже, приведені дані дають підстави пов'язати всі відхилення від нормальній роботи прискорювача з наявністю нейтрального газу навколо контейнера.

## 8. АНАЛІЗ РЕЖИМУ РОБОТИ ПІД ЧАС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Вимірювання струму споживання від бортових батарей, напруги на накопичувачі  $U_{\text{ен}}$  та напруги на аноді лампи  $U_{\text{ал}}$  під час експерименту не проводились. Але характеристики режиму можна оцінити, додатково використовуючи дані лабораторних випробувань.

**Ємнісний накопичувач.** Згідно зі схемою (рис. 2) для напруги на накопичувачі маємо  $U_{\text{ен}} = U_{\text{ал}} + U_{\text{кГ}}$ . Середнє значення  $U_{\text{ен}}$ , біля якого коливалася напруга на накопичувачі, можна визначити, використовуючи дані про напругу на гарматі під час інжекції та враховуючи падіння напруги на повністю відкритій лампі ( $U_{\text{ен}} < 200$  В). Гостра на початку експерименту вершина імпульсу з часом ставала округлою. Коли лампа відкривалася повністю, гостра вершина змінювалася короткою (5...15 мс) експоненціальною ділянкою. Спираючись на це, можна визначити, що напруга на накопичувачі коливалася біля середнього значення  $\tilde{U}_{\text{ен}} = 5.5$  кВ. Враховуючи, що  $U_{\text{ал}} < 200$  В, знаходимо, що максимальне значення  $U_{\text{енmax}} = 6.5$  кВ, мінімальне —  $U_{\text{енmin}} = 4.7$  кВ. Амплітуда пульсацій напруги  $\Delta U_{\text{ен}}$  на накопичувачі (або напруги живлення гармати) для прямокутного імпульсу за даними телеметрії становила 2.7 кВ.

Параметри імпульсу інжекції № 67

t, мс	E <sub>b</sub> , eВ	I <sub>b</sub> , мА
0	6200	510
50	5988	486
100	5817	467
150	5593	449
200	5464	433
250	5300	417
300	5087	403
350	4965	393
400	4895	380
450	4758	371
500	4580	363
550	4480	353
600	4325	342
650	4180	334

Основні втрати за цикл інжекції приблизно дорівнюють сумі втрат в «прямокутній» та в трикутній інжекції і становлять

$$A_{\Sigma} = \sum_{m=1}^2 \int_0^{\tau_m} I_{kF} U_{eH} dt.$$

Використовуючи параметри імпульсу інжекції № 67 (див. табл.), для «прямокутного» імпульсу маємо  $A_{\Pi} \approx 1.42$  кДж. Оцінка для трикутного імпульсу інжекції № 68 дає  $A_T \approx 0.67$  кДж. Звідки за період ( $T_0 \sim 10.6$  с) одного циклу інжекції маємо  $A_{\Sigma} \approx 2.1$  кДж.

**Регулювальна лампа.** Під час інжекції прямокутного імпульсу лампа була повністю відкрита, тобто,  $U_{aL} < 200$  В. Тому величина миттєвої потужності на її аноді становила менше 100 Вт. Під час формування трикутного імпульсу на аноді лампи розсіювалась більша потужність, але її миттєве значення не перевищувало 600 Вт. Ця величина менше від паспортної гранично допустимої потужності 1000 Вт, що може короткочасно (не довше 10 с) розсіюватись на аноді.

Потужність  $P_a$ , усереднена за період  $T_0$  одного циклу інжекції, становить приблизно

$$\tilde{P}_a = \frac{\sum_{i=1}^2 \int_0^{\tau_i} U_{aL} I_{kF} dt}{T_0} \approx 34 \text{ Вт},$$

що навіть менше від паспортної гранично допустимої потужності 60 Вт, яка може тривалий час розсіюватись на аноді без примусового охолодження. Отже, при нормальній інжекції межі допустимого режиму лампи не були перевищені.

«Короткі замикання» в гарматі, або перевантаження зворотним іонним пучком, були тривалими лише в інжекціях № 156...159 на нисхідній ділянці

траекторії. При цьому за один цикл інжекції на аноді розсіювалась усереднена потужність не більше 200 Вт. Це менше від паспортної потужності 400 Вт, яка тривалий час може розсіюватись на аноді. Але імпульсна потужність могла становити значну величину: в прямокутному імпульсі до 2.2 кВт, в трикутному — до 1.26 кВт (хоча гранична паспортна величина енергії в імпульсі 10 кДж за 10 с при цьому не була перевищена). Ці оцінки потужності є верхньою межею і фактична величина могла бути майже вдвічі меншою.

**Високовольтний зарядний пристрій.** Користуючись попередньою оцінкою втрат енергії у високовольтному накопичувачі, знаходимо, що корисна потужність ВВЗП, яка йшла на підзарядку ємісного накопичувача, становила  $P_{BVBZP} \approx A_{\Sigma} / T_0 \approx 200$  Вт при загальній тривалості циклу інжекції  $T_0 = 10.6$  с. Отже, при  $U_H = 5.5$  кВ груба оцінка зарядного струму дає величину  $i_{\text{зар}} \approx 36$  мА. Ця величина не сильно відрізняється від вимірюваних при лабораторних випробуваннях та каліброках (див. п. 5).

## 9. ПІДСУМКИ

Із приведеної в статті фактичного матеріалу видно, що в експерименті Г60С реальний льотний зразок прискорювача працював з навантаженням, яке було помітно нижче від максимально можливого (див. п. 5). Тому для порівняння з прискорювачем прямого живлення на неперервному перетворенні візьмемо максимальні характеристики прискорювача Г60С, тобто ті, на які він потенційно здатний.

Для прикладу розглянемо тільки струм енергоспоживання від енергомережі 30 В для обох типів прискорювачів. В експерименті Г60С при інжекції пучка імпульсною потужністю 3.2 кВт високовольтний зарядний пристрій споживав орієнтовно лише 12 А (замість 110 А для другого типу прискорювача). При максимальному використанні можливостей цей же прискорювач Г60С міг інжектувати пучки потужністю до 5 кВт (максимальна потужність, яку може комутувати пентод ПП1-0.5/10). Експлуатація накопичувача К-41И-7 під напругою 9...10 кВ можлива й доцільна. При цьому зарядний пристрій мав би потужність тільки 400...500 Вт і споживав би струм 15...17 А (замість 160...170 А для прискорювача прямого живлення).

Якщо прийняти до уваги, що в експерименті Г60С загальна маса комплексу наукової апаратури становила 94 кг, то можна побачити, що прискорювач прямого живлення у випадку його застосування

«з’їв» би майже цілком весь виділений для комплексу ліміт маси, який становив 100 кг.

Крім енерго- та ресурсозбереження, описаний прискорювач у порівнянні з прискорювачем на прямому перетворенні енергії вужче спеціалізований і гнуучкіший та надає нові можливості у здійсненні керованої взаємодії «інструмент—середовище» в активному експерименті.

Наведені висновки ґрунтуються на роботі декількох екземплярів прискорювача цього типу з гарматами діодного типу і стосуються інтервалу прискорюючих напруг  $U_{\text{кГ}} \leq 10 \dots 20$  кВ та струмів інжекції  $I_{\text{кГ}}$  не більше кількох ампер.

1. Балебанов В. М., Гагуа Т. И., Клос З. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инъекции пучка электронов с высотного зонда. Исследование пучково-плазменного разряда. — М., 1983.—38 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космич. исследований; № 781).
2. Кирага А., Клос З., Кочмарев Л. Ю. и др. Исследование в условиях лаборатории основных характеристик пучково-плазменного разряда, возникающего в ракетных экспериментах. — М., 1981.—28 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космич. исследований; № 617).
3. Куклинский Б. Д., Леонов Н. А., Манагадзе Г. Г. и др. Ускоритель электронов на емкостных накопителях для активных экспериментов в космосе. — М., 1983.—18 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космич. исследований; № 860).
4. Леонов М. А. Бортовой прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: основні співвідношення та оцінки // Косміч. наука і технологія.—1996.—2, № 5-6.—С. 46—52.
5. Леонов М. А. Бортовой прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: особливості // Косміч. наука і технологія.—1997.—3, № 5-6.—С. 84—91.

6. Friedrich M., Riedler W., Torkar K. M., Managadze G. G., Leonov N. A., Lyakhov S. B. and Martinson A. A. Potential observations of an electron-emitting rocket payload // Adv. Space Res.—1988.—8, N 1.—P. (1)192—(1)196.
7. Klos Z., Zbyszynski Z., Managadze G. G., Lyakhov S. B., Gagua T. I., Torkar K. M., Friedrich M. and Riedler W. Some features of RF emissions observed by an electron-emitting rocket payload // Adv. Space Res.—1988.—8, N 1.—P. (1)119—(1)122.
8. Managadze G. G., Balebanov V. M., Burchuladze A. A., et al. Potential observations of an electron-emitting rocket payload and other relayed plasma measurements // Planet. and Space Sci.—1988.—36, N 4.—P. 399—410.
9. Sagdeev R. Z., Managadze G. G., Maiorov A. D., et al. Peculiarity of the environment disturbance during the electron beam injection from the rocket // Adv. Space Res.—1981.—1, N 2.—P. 77—87.
10. Szuszczewicz E. P. Controlled electron beam experiments in space and supporting laboratory experiments: a review // J. Atmos. and Terr. Phys.—1985.—47, N 12.—P. 1189—1210.
11. Torkar K. M., Friedrich M., Riedler W., et al. Collection of data obtained from the rocket flight G-60-S. — Graz, 1985.—IWF 8501.

#### ONBOARD ELECTRON ACCELERATOR WITH A CAPACITANCE STORAGE: EXPERIMENT G60S

**M. A. Leonov**

The onboard electron beam accelerator with a capacitance storage used in the high altitude rocket experiment G60S is described in detail. The accelerator operation modes during normal injections and malfunctions are analyzed. Some quantitative evaluations of the operation modes are made. Among the malfunctions, individual high voltage breakdowns, a gas discharge in the anode—cathode interval of the electron gun, as well as the return ion stream were observed.

УДК 629.07.54

## Генератор аеродинамического шума в наземных испытательных комплексах КА

**В. В. Каракун, А. В. Петрик**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

*Надійшла до редакції 15.12.97*

Здійснюється аналіз роботи генератора аеродинамічного шуму на базі роторної пневматичної сирени в системі наземних випробувальних комплексів літальних апаратів.

В практике исследований свойств механических конструкций КА, в том числе бортовой аппаратуры, работающих в условиях акустического воздействия высокой интенсивности и широкого частотного диапазона, отечественными и зарубежными учеными и инженерами достигнуты определенные успехи. Разработаны методики расчета приближенных (бесконечных по протяженности) механических моделей и некоторых типов уточненных (конечных размеров) моделей. Однако эти расчеты носят оценочный характер с большой долей случайности и не могут обрисовать действительной картины влияния акустического воздействия на материал конструкций и элементы бортовой аппаратуры. Определяющим и окончательным по достоверности в настоящее время все же остается экспериментальное исследование акустической выносливости изделий в специально оборудованных наземных испытательных комплексах.

При их проектировании прежде всего встает вопрос выбора источника акустического излучения, который обладал бы высоким коэффициентом полезного действия, был простым в наладке и эксплуатации и имел достаточные возможности формирования звукового поля заданного состава. Большинству этих требований, особенно по первому, и главному, параметру, удовлетворяют сирены.

До настоящего времени не выполнены в достаточном объеме расчеты сирен, доведенные до инже-

нерных исполнений. Не проведен сравнительный анализ свойств однороторных и многороторных конструкций, не решены представляющие практический интерес задачи оптимизации. Совсем не освещен в литературе вопрос влияния на работу сирены кинематического возмущения со стороны основания.

Обобщению уже имеющихся сведений, систематизации методики расчета и проектирования сирен, раскрытию их новых особенностей и свойств посвящена настоящая статья. Вместе с тем здесь не ставилась задача проблемного решения вопроса создания звукового поля с помощью сирен, а лишь рассмотрены некоторые аспекты теории и практики, которые, по мнению авторов, либо нуждаются в серьезной доработке, либо до сих пор вообще не нашли отражения в исследованиях.

Основными особенностями нагружения конструкций КА в акустическом поле реактивных двигателей и турбулентного пограничного слоя является широкополосный частотный спектр и случайный характер изменения величины акустического давления. Это приводит к тому, что в тонкостенных элементах конструкции генерируется множество форм колебаний, которые могут совпадать с собственными. Сравнивая результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что наиболее опасным с точки зрения возникновения акустической усталости в материале конструкции

КА является широкополосное частотное нагружение, имеющее место, например, при работе реактивной струи, при возникновении турбулентности от срыва воздушного потока и др. Для реактивных двигателей наибольшее количество звуковой энергии передается остронаправленными интенсивными волнами Маха и сферическими звуковыми волнами [5].

В настоящее время нашли применение такие мощные источники шума, как воздушные струи, аэродинамические трубы, реактивные струи двигателей, воздушные винты, громкоговорители, сирены.

Спектр шума реактивных струй (горячих и холодных) наиболее полно воспроизводит натуральный спектр двигателей, а уровень шума, создаваемый ими, составляет 150—170 дБ [8]. Недостатком этого метода является низкий КПД — около 1 %.

Аэродинамические трубы дают наибольшее приближение к условиям возбуждения конструкций от турбулентного пограничного слоя ( $\text{КПД} \approx 1\text{--}2\%$ ) [6].

Громкоговорители ( $\text{КПД} \approx 5\text{--}20\%$ ) имеют широкий частотный диапазон (до 20 Гц) и уровень звукового давления не более 150 дБ в небольших камерах [9]. В реверберационных камерах они могут сами повреждаться от генерируемого ими шума.

Наибольшее распространение среди других типов источников шума получили сирены. Они позволяют генерировать звуковое давление 160—180 дБ с частотным диапазоном 50—5000 Гц. При этом коэффициент полезного действия у них самый высокий и составляет 4—40 %.

Одним из первых источников широкополосного шума была предложенная в США фон Гирке и др. многороторная сирена [7]. Наряду с достоинствами — возможность генерировать шум с общим звуковым давлением до 170 дБ и акустической мощностью 50 кВт — многороторные сирены обладают рядом недостатков — ни теоретически, ни экспериментально не установлены оптимальные параметры роторов для получения заданного спектра, имеются сложности в изготовлении, наладке и эксплуатации таких сирен.

Оригинальная конструкция сирены для создания случайного шума предложена сотрудниками Саутгемптонского университета [10]. Модуляция воздушного потока здесь производится с помощью стальной ленты с отверстиями, расположенными по остаточному циклическому квадратичному цепному коду. Протягивая с большой скоростью ленту, прерывают воздушный поток, вследствие чего возникают звуковые колебания, уровень которых до-

стигает 165 дБ. К недостаткам можно отнести сложность эксплуатации стальной ленты.

Таким образом, в настоящее время создано довольно много установок для испытания изделий на акустическую прочность. По частотным характеристикам эти установки могут быть разделены на два класса — дискретные и широкополосные. Причем вторые, как уже отмечалось, наилучшим образом воспроизводят эксплуатационные условия.

В отечественной литературе первые и, по-видимому, самые полные сведения по теории и расчету сирен представлены в работах [1, 2]. Исследована математическая модель роторной сирены, влияние геометрических параметров окон и расстояния между дисками ротора и статора на структуру спектра и интенсивность звука.

Работу однороторной сирены покажем на примере известной ее технической реализации в виде [4]. Механическая модель представляет собой два соосных диска с радиальными окнами, один из которых подвижен (ротор), а другой — неподвижен (статор) и жестко крепится к корпусу сирены. Поток воздуха под давлением поступает в камеру сирены, а затем, проходя через окна, прерывается вращающимся ротором и создает звуковые колебания среды.

Принимая размеры дисков малыми по сравнению с длиной волны, считаем, что акустический процесс подчиняется линейным уравнениям.

При принятой геометрии окон функция модуляции воздушного потока  $f(t)$  будет практически повторять геометрию окон ротора, и поэтому может быть представлена в данном случае в виде периодической квазитрапецеидальной функцией (рис. 1) с периодом  $T = 2\pi\omega^{-1}$ ; здесь  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора. Длительность единичного импульса  $t_0 + t_1$  определяется равенством  $t_0 + t_1 = Tm^{-1}$ , а  $m$  — число равных участков, на которое разбивается окружность ротора. Таким образом, продолжительность единичного импульса будет оп-

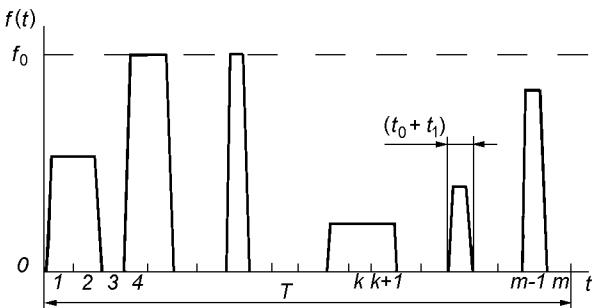


Рис. 1. Функция модуляции однороторной пневматической сирены

ределять минимальный размер окон ротора.

Вообще говоря, форма функции модуляции может быть и несколько иной, определяясь в каждом конкретном случае экспериментально, так как здесь немаловажную роль играют и параметры компрессорной системы [1]. Функция модуляции может иметь форму коммутиированной синусоиды, треугольную форму, форму сопряженных дуг парабол и более сложных кривых.

Чтобы получить требуемую форму функции модуляции необходимо обеспечить давление в набегающей струе не менее 2—3 атм, так как дальнейший прирост уровня давления не оказывает решающего влияния на скорость воздуха в выхлопной струе, определяющей в основном звуковую мощность.

С другой стороны, при работе сирены возможен одновременный расход воздуха через несколько окон, что отразится на давлении струи, поэтому, обеспечив двух- или трехкратный запас уровня давления компрессора, можно достичь требуемого постоянства давления нагнетаемого потока среды.

Чтобы обеспечить случайный характер распределения окон по окружности диска ротора, они наносятся по остаточному циклическому квадратичному цепному коду, вследствие чего на некоторых участках окна могут находиться рядом, а на других — отсутствовать. На тех участках, где окна нанесены, значение функции модуляции определяется выражением  $f(t) = \lambda_k f_0$  ( $0 \leq \lambda_k \leq 1$ ,  $k$  — номер участка). Там, где окна отсутствуют, функция модуляции равна нулю.

Предположим для простоты, что функция модуляции  $f(t)$  является четной и периодической, т. е.  $f(t) = f(t + T)$ . В этом случае она может быть представлена в виде разложения в тригонометрический ряд

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) \quad (1)$$

с коэффициентами

$$\frac{a_0}{2} = f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T},$$

$$a_n = f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}},$$

где  $n$  — номер гармоники;  $f_0$  — высота импульса. Суммируя по участкам, где  $f(t) \neq 0$  (эти суммы обозначены штрихом), получим

$$\frac{a_0}{2} = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T},$$

$$a_n = \sum_{k=1}^p 2\lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}}$$

Здесь  $p$  — число единичных импульсов в течение периода  $T$ , поэтому  $1 < p \leq m$ ;  $t_1$  — время формирования фронта импульса (рис. 2).

Таким образом, функция модуляции будет иметь вид

$$f(t) = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^p 2\lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \times \\ \times \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}} \cos n\omega t. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для случая, когда на статоре имеется только одно окно. Если на статоре будет нанесено  $s$  окон одинакового размера, равнодistantных от центра диска статора и сдвинутых относительно базовой оси на угол  $\varphi_1$  (рис. 3), то функция модуляции всего потока среды, проходящего через сирену, будет равна сумме функций

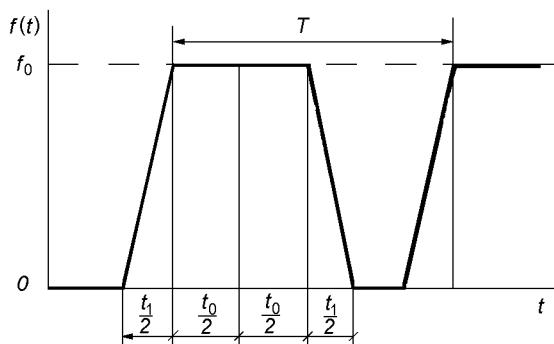


Рис. 2. Функция модуляции однороторной сирены

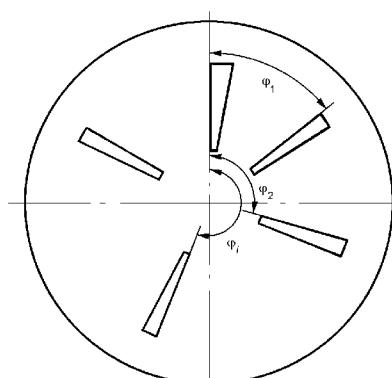


Рис. 3. Схема взаимного расположения окон на диске статора

модуляции каждого из окон [3].

С учетом сказанного, формула (1) преобразуется к виду

$$f(t - t_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i), \quad (3)$$

где  $t_i = \varphi_i \omega^{-1}$ . Тогда суммарная функция модуляции с учетом (3) для всех окон статора будет определяться выражением

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i) \right], \quad (4)$$

где  $s$  — количество окон. В окончательном виде суммарная функция модуляции может быть представлена в виде

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{pf_0}{2m} + \frac{4mpf_0}{\pi |(m\omega t_0 - \pi)|} \times \right. \\ \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left( n \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\omega(t - t_i) \right\}. \quad (5)$$

Обозначив

$$\frac{4mpf_0}{\pi |(m\omega t_0 - \pi)|} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left( \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \times \\ \times \sin \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i = B_n, \quad (6)$$

$$\frac{4mpf_0}{\pi |(m\omega t_0 - \pi)|} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left( \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \times \\ \times \sin \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i = C_n,$$

можем вычислить амплитуды  $A_n$  гармоник спектра, применив известное равенство Парсеваля:

$$A_n = [B_n^2 + C_n^2]^{1/2} = \frac{4mpf_0}{\pi |(m\omega t_0 - \pi)|} \times$$

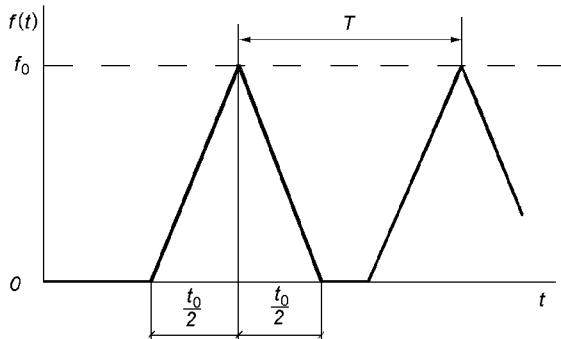


Рис. 4. Функция модуляции однороторной пневматической сирены

$$\times \left[ \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left( \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left( \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Определим спектр однороторной сирены, положив для конкретности, что на статоре равномерно, через  $\pi/4$  рад, нанесены 8 одинаковых радиальных окон, ширина которых равна ширине наименьшего окна ротора, а высота — высоте наибольшего окна (рис. 5, а). Число мест  $m$  на роторе примем равным, например, 59.

Окружность диска ротора разбиваем на 59 равных частей (число мест  $m = 59$ ). В промежутке чисел от 0 до 59 вычисляем квадраты простых чисел, а затем определяем остатки от деления их на  $m$ . В соответствии с остаточным циклическим квадратичным цепным кодом это обеспечит случайный характер распределения окон на диске ротора. Проведя указанную процедуру, определяем, что окна на диске ротора должны наноситься на интервалах 1, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 41, 45, 46, 48, 49, 51, 53 и 57 (рис. 5, б). Таким образом, число окон на роторе равно 15.

Введем обозначение

$$A_n^0 = \frac{\pi A_n |(m\omega t_0 - \pi)|}{4mpf_0}$$

и определим спектральный состав генерируемого сиреной шума для следующих числовых значений параметров:  $\omega = 300 \text{ c}^{-1}$  ( $n = 3 \cdot 10^3$  об/мин),  $\varphi_1 = 0$ ,  $t_0 + t_1 = 1.77401 \cdot 10^{-4}$  с. Рассмотрим вначале более простой случай, когда  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = 1$ , т. е. высоты всех окон ротора одинаковы.

Спектр сирены, как показывают вычисления, при числе мест  $m = 59$  имеет неравномерную частотную

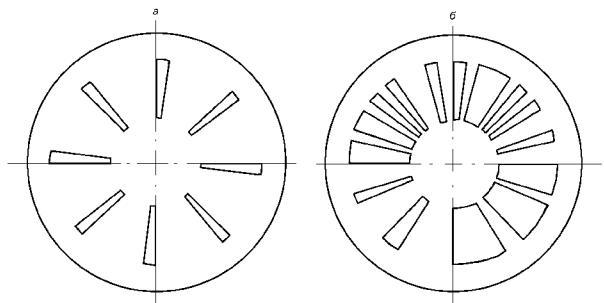
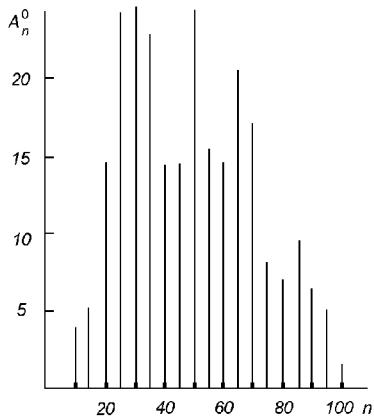
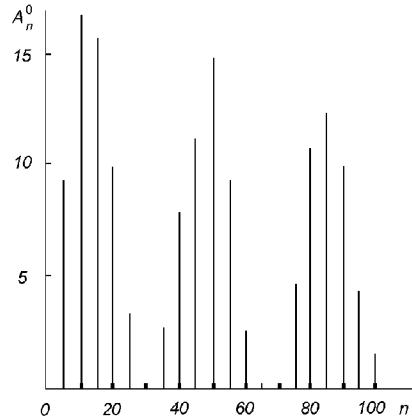


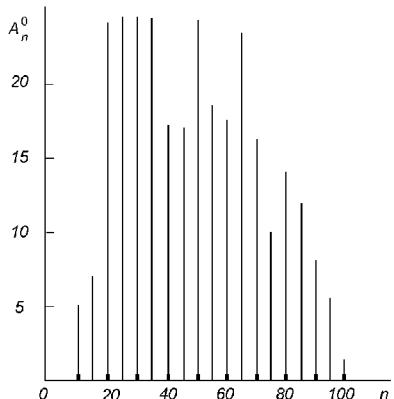
Рис. 5. Пневматическая сирена роторного типа: а — статор, б — ротор ( $m = 59$ )

Рис. 6. Спектр сирены при числе мест  $m = 59$ Рис. 7. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест  $m = 18$ 

характеристику с несколькими «пиками» (рис. 6). Очевидно, что средняя мощность процесса здесь распределяется неравномерно по частоте. Так, две полосы спектра —  $n = 25—35$  и  $n = 50—55$  имеют амплитуды в два раза больше, чем у спектральных составляющих  $n = 35—50$  и  $n = 55—65$ , и в 3—4 раза больше остальных составляющих спектра. Что же касается форм с номерами выше 95, то они практически отсутствуют в спектре сирены.

Таким образом, использование такой сирены весьма ограниченно, так как она генерирует низкие формы ( $n \leq 70$ ) акустического излучения.

Принятые механическая и математическая модели однороторной сирены, как видно, подтверждают возможность получения акустического излучения для выбранной конструкции. Представленные аналитические выражения позволяют исследовать зависимость амплитуд спектра сирены от задаваемых значений параметров конструкции и дают возможность проводить качественные и количественные исследования возможностей сирены.

Рис. 8. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест  $m = 59$ 

Теоретический и практический интерес представляет рассмотрение работы сирены с функцией модуляции, имеющей форму треугольных импульсов (рис. 4). Такая форма функции модуляции может иметь место при абсолютном совпадении геометрии окон ротора и статора. С другой стороны, в форме треугольника или его комбинаций могут быть изготовлены окна дисков ротора и статора.

Суммарная функция модуляции для этого случая будет иметь вид

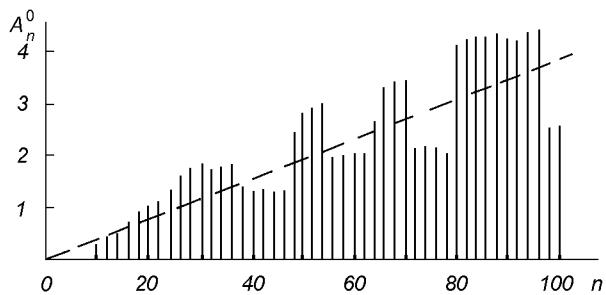
$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left[ \frac{pf_0}{2m} + \frac{2pf_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]. \quad (8)$$

Вводя обозначения

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i = B_n, \quad (9)$$

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i = C_n, \quad A_n^0 = \frac{\pi A_n}{2pf_0},$$

с учетом равенства Парсеваля получаем формулу для вычисления амплитуд гармоник спектра сирены:

Рис. 9. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест  $m = 276$

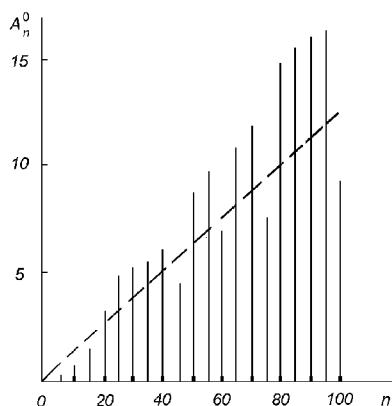


Рис. 10. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест  $m = 1528$

$$A_n = [B_n^2 + C_n^2]^{1/2} = \frac{2pf_0}{\pi} \times \\ \times \left[ \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left( \pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

При числе мест  $m = 18$  (рис. 7) в спектре наблюдаются явно выраженные три полосы частот: 0—20, 35—55, 75—95, а на участках 25—35, 55—75 и 95—100 — «провалы». Таким образом, ротором сирены с числом мест  $m = 18$  удобно пользоваться для формирования заданных частотных полос спектра. Для значений  $m = 59$  (рис. 8) спектр схож с спектром сирены, у которой функция модуляции имеет квазитрапецидальную форму (рис. 6); они практически совпадают.

При числе мест  $m = 276$  (рис. 9) и выше (например,  $m = 1528$ ) (рис. 10) спектр сирены имеет тенденцию к увеличению амплитуд гармоник с увеличением их номера. Это свойство, наряду с белым шумом, очень важно для практики, так как позволяет оценивать акустическую податливость элементов конструкции и бортовой аппаратуры,

собственные частоты которых достаточно высоки. В этом случае сирены с числом мест  $m = 59$  непригодны, так как амплитуды гармоник с номерами выше 120 практически отсутствуют, и вся энергия акустического излучения сосредоточена на низких частотах.

С увеличением числа мест  $m$  на роторе характеристика спектра располагается более круто относительно оси частот (рис. 10, штриховая линия).

1. Карновский М. И. Теория и расчет сирен // Журн. техн. физики.—1945.—15, вып. 6.—С. 348—364.
2. Карновский М. И. К расчету сирен // Изв. ВУЗов Радиотехника.—1958.—№ 1.—С. 64—68.
3. Квитка В. Е. Исследование условий нагружения элементов конструкций самолетов акустическими нагрузками // Прочность и долговечность самолетных конструкций. — К.: Изд-во КИИГА, 1965.—Вып. 2.
4. Махотнюк Л. Е., Каштаян Ю. А. Однороторная сирена // А. с. 228565 СССР. МПК<sup>4</sup> G IO K. Опубл. 08.10.68, Бюл. № 31.
5. Фокс Д. Е. Вильямс. Шум высокоскоростных ракет // Случайные колебания / Под ред. С. Крендела. — М.: Мир, 1967.—С. 45—49.
6. Ailman C. M. Wind tunnel investigation of fluctuating pressures at the surface of 2.75 % Saturn models // Acoustical fatigue in aerospace structures: Proc. of the Second International Conference, Dayton, Ohio, April 29—May 1, 1964. — Syracuse, 1965.—P. 278—286.
7. Cole J., Powell R., Oestreicher H., von Giere H. Acoustical siren for generating wide band noise // J. Amer. Statist. Assoc.—1963.—35, N 2.—P. 173—191/
8. Doolittle R. D., Überall H. Sound scattering by elastic cylindrical // J. Amer. Statist. Assoc.—1966.—39, N 2.—P. 272—276/
9. Hubbard H. H., Houbolt S. C. Vibration induced by acoustic waves // Shock and vibration handbook / Ed. by C. M. Harris, Ch. E. Grede. — 1961.—P. 321—332.
10. Parks P. C., Mercer C. A. A «Random» siren using cycles chain codes // Reports 5 Congr. International D'Acoustique, 1965.—54.—P. 1072—1076.

#### GENERATOR OF AERODYNAMIC NOISE IN GROUND COMPLEXES FOR SPACECRAFT TESTING

V. V. Karachun, A. V. Petrik

We analyze the operation of an aerodynamic noise generator based on a pneumatic rotor siren in the system of ground complexes for spacecraft testing.

УДК 550.34+550.38

Комплекс наземных сейсмопрогностических  
наблюдений, методов их обработки и анализа  
совместно с данными космических наблюдений

С. В. Мостовой, В. И. Старostenко, О. М. Харитонов

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 03.12.97*

Розглянута методика комплексування наземних та космічних вимірювань геофізичних полів з метою прогнозу землетрусів. Значна увага приділена обробці та аналізу тих полів, в яких раніше мали місце прояви передвісників сейсмічних подій. Запропонована математична модель прогнозу землетрусу. Процес виявлення передвісників розглядається як задача детектування сигналу передвісника на тлі багатовимірного випадкового процесу, який являють собою вимірювання геофізичних полів в іоносфері Землі та на її поверхні.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогноз землетрясений включает прогноз места, времени, интенсивности будущего очага сейсмической активности и носит вероятностный характер. Поэтому для повышения надежности прогноза практикуется комбинирование разных методов исследований, в частности космических и наземных наблюдений. Настоящая работа посвящена комплексу наземных сейсмопрогностических наблюдений, который может быть организован на территории Украины для оценки сейсмической опасности в ее пределах.

Процесс подготовки сильного землетрясения очень длителен и охватывает значительные области площадью в несколько тысяч кв. км. С течением времени накопление напряжений локализуется и процесс завершается быстрым освобождением энергии в ограниченном объеме, называемом очагом землетрясения. Определение параметров этого очага и времени его разрядки составляет основную задачу прогноза. Так как подготовка землетрясения сопровождается изменением свойств среды, геофизических полей и химического состава гидросфера, то перечисленные флюктуации могут служить

предвестниками будущего разрушительного события. Наиболее информативными признаками подготовки сильного землетрясения являются вариации отношения скоростей распространения продольных и поперечных волн ( $V_p/V_s$ ), стягивание эпицентров слабых землетрясений к будущему очагу разрушения среды, изменение уровня подземных вод, вариации магнитного поля и электропроводности Земли, водонасыщение пород и содержание радона в подземных водах, скорости крипа и изменения температурного режима. Ни один из перечисленных признаков не является достаточно надежным предвестником приближающегося интенсивного землетрясения. Только комплексный подход может дать обоснованный ответ на вопрос о месте, времени и интенсивности землетрясения.

Анализ современного состояния геофизической науки позволяет сделать вывод об изменении тенденций в ее развитии. Наряду с традиционно глубоким анализом геофизических полей и связанных с этими полями процессов в коре и мантии Земли, с совершенствованием математических моделей этих процессов, совершенствованием измерительной аппаратуры и (может быть самое важное) наблюдательной сети, которая теперь включает в

себя еще и спутниковые наблюдения за динамикой состояния ионосферы, и возможностями вычислительных средств осуществлять сложную обработку огромных массивов данных наблюдательной сети в реальном времени, появилась возможность мониторинга геофизических полей и связанная с этим возможность изучения динамики коротко живущих и слабо выраженных процессов, таких как подготовка сейсмических событий.

Под геофизическим мониторингом будем понимать режимные наблюдения за геофизическими полями и их анализ для изучения динамики Земли и ее фрагментов и прогноза их развития. Нужно отметить, что режимные наблюдения для геофизики не новость, а суть ее существования, но мониторингом такие наблюдения становятся лишь при возможности анализа данных в реальном или близком к нему времени. Огромные массивы обрабатываемой информации требуют автоматизированного анализа, оценок интерпретируемых параметров, конструирования выводов и принятия решения. Последнее должно осуществляться в интерактивном режиме информационного обмена между исследователем и системой. Перечисленные обстоятельства требуют создания математических моделей процессов формирования полей для работы в системах мониторинга, т. е. оперирующих небольшим числом параметров для возможности быстрой их оценки и экспресс анализа в автоматизированной системе. Сложность модели, или количество описывающих ее параметров, определяется возможностями системы обработки и целями экспресс-анализа в автоматизированном режиме.

#### СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ЗОНЫ УКРАИНЫ

Сейсмоактивные зоны Украины сосредоточены в двух регионах, Крымском и Карпатском. В Крымском регионе можно выделить две сейсмоактивные зоны: Южнобережную с максимальной интенсивностью землетрясений 7–8 баллов в районе г. Ялты и Южноазовскую в районе одноименного разлома вблизи Керченского полуострова с интенсивностью воздействий того же порядка. В Карпатском регионе можно выделить три сейсмоактивные зоны: Закарпатье с максимальной интенсивностью колебаний вблизи эпицентров 7–8 баллов, Предкарпатье и Буковину с интенсивностью 5–6 баллов и расположенную в Румынии область сочленения Восточных и Южных Карпат — Вранча. Последняя зона оказывает существенное влияние на сейсмический режим территории Украины. При максимально возможных по энергетическому классу событий зоны

Вранча, магнитуда которых равна 7.5, интенсивность сотрясений на юго-западе Одесской области может достигать 8 баллов. Для изучения геодинамических процессов в указанных районах созданы Крымский и Карпатский геодинамические полигоны. На Крымском геодинамическом полигоне расположены 6 стационарных сейсмических станций и 5 пунктов комплексных геофизических наблюдений. В Карпатском регионе — 11 стационарных сейсмических станций и 10 пунктов комплексных наблюдений. Это позволяет проводить изучение следующих предвестников землетрясений.

#### СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системы стационарных станций в Крымском и Карпатском регионах позволяют достаточно надежно регистрировать времена прихода волн не только от сильных, но и от слабых землетрясений, выявлять основные закономерности размещения очагов в сейсмогенных зонах, изучать закономерности подготовки сильных землетрясений и увязывать их с геофизическими и геохимическими процессами в окружающей среде. При подготовке сильного землетрясения происходит стягивание мелких трещин к направлению сейсмогенерирующего разлома, что достаточно надежно контролируется по сейсмологическим данным.

Этот процесс охватывает несколько десятилетий и относится к числу долгосрочных прогнозных признаков. За несколько лет до сильного землетрясения наблюдается продолжительный период сейсмологического затишья, характеризующегося накоплением энергии деформации горных пород и завершающегося кратковременным освобождением ее в ограниченном объеме. Процесс стягивания слабых толчков к будущему сильному сопровождается изменением свойств среды и соответствующими вариациями свойств геофизических полей.

Прогностические свойства сейсмических полей исследуются на геодинамических полиграх Украины. При изучении изменения сейсмического процесса в преддверии сильного землетрясения в Крымском регионе исследовано пространственно-временное распределение слабых толчков энергетического класса  $K = 8-9.5$ , предшествующих более сильным землетрясениям  $K > 11$ . Для этого использовано поле слабых толчков. Были предсказаны 5 сильных сейсмических событий, эпицентры которых относятся к центральной части Крымско-Черноморского региона. Исследование распределения во времени слабых толчков при подготовке сильно-го и изменение расстояния между ними и эпицент-

ром главного события оценено как перспективное направление прогностических признаков.

Для анализа процесса подготовки сильных землетрясений в Крыму изучались и опробованы в других регионах параметры, такие как угловой коэффициент наклона графика повторяемости землетрясений  $\gamma$ , число землетрясений  $n$ , соотношение скоростей распространения  $V_p/V_s$  и амплитуд колебаний  $A_p/A_s$  продольных и поперечных объемных волн [2, 3, 6, 11, 15–18].

По результатам изучения пространственно-временных изменений полей, а также по изучению энергетических характеристик сейсмического процесса, предшествовавшего карпатскому глубокофокусному катастрофическому землетрясению 04.03.1977 г.,  $M = 7.2$  ( $K = 17$ ), выявлено существование определенных закономерностей в преддверии крупного землетрясения в зоне Вранча [13]. Основные из них: 1) резкое сужение эпицентрального поля слабых событий ( $K = 11–13$ ) в пятилетний период, предшествующий сильному землетрясению, в узкую полосу, совпавшую с поверхностью будущего магистрального разрыва; 2) концентрация сейсмической активности в области будущего очага за несколько лет до главного события; 3) прекращение процесса за пределами этой области; 4) уменьшение углового коэффициента с  $\gamma = 0.48$ , характерного для спокойного режима, до  $\gamma = 0.30$ , что свидетельствует о резком ускорении процесса образования крупных трещин в области подготовки макротрешины.

Согласно выявленным перечисленным признакам подготовки землетрясения 04.03.1977 г. был дан пробный прогноз места сильного очередного события, произшедшего 30.08.1986 г. в районе Вранча. Магнитуда этого землетрясения соответствовала 6.9 ( $K = 16.4$ ). В отношении предсказания точного времени возникновения сильного сейсмического события дело обстоит сложнее. Как отмечено в работе [13], отсутствуют критерии, четко указывающие на завершение процесса стягивания эпицентров, т. е. процесса развития очага. Это создает серьезные трудности для прогноза времени возникновения очередного разрушительного события. Следовательно, к изменению сейсмического поля (по расположению эпицентров слабых толчков) можно относиться как к долгосрочному предвестнику. Информация о среднесрочных и краткосрочных предвестниках в определенной мере может быть получена при рассмотрении их временных вариаций.

По наклономерным наблюдениям, проведенным в Кишиневе, обнаружено появление аномального короткопериодного наклона флюктуирующего типа за несколько суток перед карпатским землетрясением

30.08.1986 г. Аналогичные эффекты наблюдались и перед более слабыми землетрясениями в Карпатском регионе.

#### ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

К длиннопериодным флюктуациям геомагнитного поля относятся вариации с периодом, превышающим сутки. Они изучаются на основании круглосуточных наблюдений полного вектора напряженности геомагнитного поля  $T$  с помощью современных протонных магнитометров МВ-01 с чувствительностью 0.1 нТл. Используется специальная дифференциальная методика, с помощью которой определяются среднесуточные значения разностного поля между парами режимных станций. Такая методика позволяет изучать только ту часть вариаций, которая обусловлена тектоническими процессами в лitosфере [8, 25].

На основании предложенной методики наблюдений изучаются изменения во времени геомагнитного поля, выделяются аномальные периоды, которые сопоставляются с сейсмическим режимом. В последние годы в Карпатском регионе получен ряд временных аномалий, которые связаны с локальными землетрясениями. К их числу относятся Чопское землетрясение 02.07.1982 г., эпицентр которого был расположен на расстоянии 10 км от границы Украины и Венгрии. Наиболее интенсивные толчки силой до 6 баллов отмечались в трех деревнях Береговского района. Отрицательная аномалия  $T$  начала формироваться в начале мая и достигла минимума в конце этого месяца, а нормальное значение  $T$  было достигнуто в середине июля.

На стадии возобновления поля и произошло землетрясение в районе Чопа. Аналогичный эффект наблюдался перед землетрясениями в районе Виноградово, серия которых произошла 06.05.1989 г., при этом отрицательная аномалия по  $T$  начала формироваться в начале года, а минимум сформировался в середине марта. За период с 1982 по 1995 гг. на территории Закарпатья отмечены аномалии  $T$ , из них 15 сопровождались землетрясениями. Характерная форма аномалий  $T$  в виде бухто-подобного возбуждения с дальнейшим восстановлением начального уровня типична для долгопериодных аномалий геомагнитного поля — предвестников землетрясений наблюдалась в других сейсмоактивных регионах [1], в частности в Крымском за 72 дня до землетрясения 1989 г. в Армении.

Приведенные примеры свидетельствуют, что долгопериодные флюктуации геомагнитного поля яв-

ляются достаточно надежными предвестниками сильных землетрясений, относятся к очень важному классу среднесрочных с упреждением 1.5—3 месяца и существенно дополняют долгосрочные прогнозы по сейсмологическим данным, так как информативны в период сейсмического затишья. Дальнейшее развитие этого направления связано с изучением изменений во времени не только модуля  $T$ , но и компонентов геомагнитного поля, что позволило бы производить увязку наземных и космических наблюдений и выяснить природу аномальных явлений. Для этого необходима дополнительная аппаратура для дооборудования существующих станций режимных наблюдений.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ

Следующий диапазон частот электромагнитного поля Земли, информативный с точки зрения подготовки землетрясений, охватывает область от десятков Гц до сотен кГц и связан с аномалиями электромагнитного излучения (АЭМИ). Информационными характеристиками в этом случае служат вариации уровня огибающей ЭМИ с амплитудой, превышающей уровень дискриминации. Эти характеристики используются для изучения корреляции во времени между сейсмическими событиями и аномалиями ЭМИ (Япония, США, Средняя Азия, Карпаты, Кавказ). Аномалии ЭМИ опережают сейсмическое событие на несколько секунд или практически совпадают с ним, как это наблюдалось во время землетрясения в районе Вранча 01.03.1977 г. или в Судаке 16.08.1990 г. Аномалии ЭМИ являются краткосрочными предвестниками и могут служить для уточнения времени и места очага землетрясения в комплексе с сейсмологическими данными. В связи с высоким фоном электрических полей техногенного и естественного происхождения, существенным влиянием метеоусловий помехоустойчивость и надежность этого метода прогнозирования землетрясений очень низкая.

### АНОМАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Короткопериодные пульсации геомагнитного поля являются наиболее тонким индикатором физического состояния магнитосферы. Данные о генерации геомагнитных пульсаций в связи с землетрясениями содержатся во многих работах, но они довольно противоречивы как относительно морфологических признаков, так и относительно механиз-

мов их генерации. Установлены связи землетрясений с такими явлениями, как аномальное увеличение интенсивности ЭМИ в ионосфере [12], изменение параметров ионосферного слоя F2 [5], увеличение среднего уровня интенсивности вариаций компонентов геомагнитного поля и другое. Эти изменения параметров разных областей магнитосферы в связи с землетрясениями показывают, что указанные выше проявления пульсаций не являются случайными.

В Карпатском отделении Института геофизики НАН Украины использованы продолжительные непрерывные наблюдения короткопериодных пульсаций типа  $Pc$  на региональной электромагнитной станции Корец за период 1969—1980 гг. Были проанализированы особенности морфологии пульсаций типа  $Pc$ . Отмечено, что кроме типовых пульсаций, которые имеют характерный суточный ход, появляются специфические пульсации  $PcS$ , которые не связаны с определенным периодом суток и возникают перед сильными землетрясениями. Было выделено около 250 пульсаций  $PcS$  и выполнен статистический анализ их связи с землетрясениями. При этом определялся интервал времени  $t$  между появлением пульсации и моментом последующего землетрясения с  $M > 4$ . Установлена линейная зависимость  $t$  от периода пульсаций  $T$ . Установлены корреляционные зависимости между периодом пульсаций  $T$  и глубиной очага землетрясений  $n$ . Выполненный анализ свидетельствует о связи процессов подготовки землетрясений со специфическими явлениями в магнитосфере Земли и нуждается в продолжении исследований в этом направлении с использованием новейшей аппаратуры с цифровой регистрацией.

### ВРЕМЕННЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследования последних лет показали, что передаточные функции геомагнитного поля (векторы Визе и индукции) испытывают аномальные изменения во времени в сейсмоактивных регионах [19]. В последних работах китайских геофизиков приведены примеры успешного применения передаточных функций для прогноза сильных землетрясений с  $M > 5$  при удалениях от эпицентра 60—410 км. Исследования такого плана проводятся в Карпатском регионе по данным трехкомпонентной магнитовариационной станции, которая установлена в 1989 г. в специальном павильоне на региональной станции «Нижнее селище». Эти данные используются для систематического определения передаточ-

ных функций и анализа их временных изменений. В результате были установлены значительные временные изменения векторов Визе и векторов индукции [21]. Связи этих аномальных изменений с конкретными сейсмическими событиями не наблюдается, но они совпадают с периодами региональной сейсмической активизации в районе Вранча и в Карпато-Динарской зоне в июне и декабре 1990 г. Возможным источником аномальных изменений можно принять локальную электропроводящую структуру, которая служит индикатором вариаций геодинамического режима в регионе. Работы в этом направлении продолжаются.

### ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ

Гидрогеохимические параметры, изучаемые на Карпатском полигоне в Закарпатье на нескольких опорных пунктах (Берегово, Свалява, Лисарня) не прореагировали на землетрясение 30.08.1986 г. В то же время были выявлены циклические колебания геохимических параметров, связанные с лунно-солнечными приливами. По данным наблюдений на семи водопунктах установлено наличие тесной корреляционной связи между атмосферным давлением и уровнем подземных вод в период сейсмического затишья и нарушение ее на расстояниях до 100 км от очагов местных землетрясений ( $K = 6-11$ ) во время активизации сейсмических процессов в Закарпатье [18].

Это подтверждает известное представление о том, что Восточные Карпаты являются природным барьером, поглощающим значительную часть сейсмической энергии, распространяющейся в северо-западном направлении от Вранча, в том числе и в Закарпатье. По поведению геохимических параметров видно, что экранируется не только сейсмическая энергия, но и изменение напряженного состояния «сейсмического тела» также не отражается в природных полях. В это же время на Крымском геодинамическом полигоне за 30 суток до землетрясения 30.08.1986 г. обнаружены изменения уровня подземных вод и их химического состава. Установлены изменения геомагнитного поля и электросопротивления за 3—4 суток до землетрясения [6]. Следовательно, система широтных разломов, направленная на восток от зоны Вранча, в частности вдоль шельфа Черного моря, проводит изменения напряжения, произошедшие в зоне Вранча перед сильным землетрясением. Это подтверждается и аномальным выделением газа (с содержанием радона) на одном из источников, расположенных на склоне Крымских гор. Вариации, связанные с под-

готовкой далеких землетрясений, в том числе и Спитакского, зафиксированы на Крымском геофизическом полигоне [4].

По результатам пятнадцатилетних наблюдений за гидрогеологическими и геохимическими параметрами в Крыму (уровнем подземных вод, температурой воды, содержанием ионов хлора, гелия и других в воде) при подготовке слабых местных землетрясений выявлены определенные закономерности, которые могут рассматриваться как прогнозные [4, 18]. Изменения параметров флюидов отмечены лишь на пунктах, расположенных в зонах, близлежащих к будущим очагам землетрясений (Алуштинское, 1984 г.; Азовское, 1987 г.; Судакское, 1990 г.). Наиболее информативными оказались газовые компоненты флюидной системы, особенно гелий. Перед Алуштинским землетрясением 05.07.1984 за 3—5 суток до возникновения первых толчков отмечено снижение концентрации гелия, затем началось ее увеличение с максимумом за три дня до главного толчка. Гидрогеохимические предвестники следует отнести к классу краткосрочных.

### ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Изменения механической напряженности в коре и мантии вызывают изменение напряженности электрического и магнитного полей как на поверхности Земли, так и в ионосфере. Свидетельством этому служит обширная библиография работ, в которых апостериори анализируется связь сейсмических событий с ионосферными возмущениями.

Связь сейсмической активности с возмущениями в ионосфере, основанная на инструментальных наблюдениях, замечена сравнительно недавно. J. W. Warwick [30] связал землетрясения в Чили с аномалиями поглощения космического радиоизлучения в ионосфере, которые наблюдались за шесть дней до события. В работе [23] отмечена корреляция между Аляскинским землетрясением 28.03.1964 г. и возмущениями в распространении радиосигналов в ионосфере в диапазоне частот 4, 5 и 10 МГц.

В работе [24] приводятся результаты радиозондирования волноводов Земля—нижняя ионосфера сверхдлинными волнами. Представлены результаты по локализации мест с аномальными характеристиками в нижней ионосфере, которые авторы связывают с сейсмо-ионосферным взаимодействием. Были отмечены изменения амплитуды и фазы сигналов в волноводе в диапазоне частот 10—15 кГц. Эти изменения отмечались в ночное время в 360 км

от района землетрясения в период от пяти дней до трех дней после Гиндукушского землетрясения 30.12.1983 г. с магнитудой 6.7 на глубине 208 км. Такая же ситуация сложилась и во время второго случая Гиндукушского землетрясения 15.11.1985 г. с магнитудой 4.6 на глубине 3 км и на удалении 200 км от эпицентра.

Попытка статистически связать низкочастотную ( $\sim 1-10$  кГц) эмиссию радиоволн в верхней ионосфере над зоной землетрясений с землетрясениями, была сделана в работе [26]. Здесь отмечалось аномальное возрастание низкочастотной эмиссии радиоволн в диапазоне частот от 0.1 до 16 кГц над эпицентром землетрясения. Измерения осуществлялись со спутника «Интеркосмос-19» в верхней ионосфере. Достоверность обнаружения указанного явления авторы оценивают как 0.8—0.9.

Пульсации вертикальной составляющей электрического и магнитного полей на частоте, близкой к 1 Гц, наблюдались над эпицентром землетрясения 21.01.1982 г. по данным наблюдений со спутника «Интеркосмос—Болгария-1300» [22].

В работе [7] отмечено, что в процессе спутниковых измерений в 1981—1986 гг. в ионосфере и магнитосфере Земли были возмущения, обусловленные сейсмической активностью, и приведены основные типы ионосферных возмущений, которые по мнению авторов можно связать с последующими землетрясениями.

К сожалению, в работах по ионосферным предвестникам нет анализа возможных источников возмущений в ионосфере, не связанных с процессами подготовки землетрясений, на фоне событий, происходящих в литосфере. Поэтому затруднительно сделать заключение о вероятности ложных тревог и пропуска сейсмического события. По-видимому, подготовка сильного землетрясения почти всегда вызывает ионосферные возмущения, в то время как подобные возмущения могут возникать еще и из-за целого ряда причин, не связанных с процессами, развивающимися в литосфере, в том числе и техногенного характера. Поэтому вероятность ложной тревоги может быть очень большой. По этой причине анализ состояния ионосферы с целью прогноза землетрясений вне системы, включающей наземные наблюдения, не представляется сколько-нибудь обещающим.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В Институте геофизики проведены работы по созданию математической модели прогноза сейсмического события, которая реализована в автоматизи-

рованной системе мониторинга объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС для целей анализа динамики состояния строительных конструкций [10].

Ретроспективный анализ произошедших землетрясений и сопутствовавших им предвестников позволяет сделать вывод о том, что в каждом конкретном случае выделить один достаточно информативный фактор в качестве предвестника не удается. Это связано, прежде всего, с наличием достаточно мощных нестационарных помех и, возможно, с тем обстоятельством, что по изменению во времени одного параметра нельзя построить процедуру принятия решения о времени и интенсивности будущего землетрясения, которая бы позволяла строить прогноз с большой вероятностью.

По-видимому, только совместный анализ совокупности достаточно большого числа малоинформационных геофизических параметров с учетом статистических свойств стационарных и нестационарных помех может оказаться перспективным для построения процедур формального принятия решения о прогнозе.

Такой подход приводит, во-первых, к необходимости исследования не связанных с предвестниками нестационарных и стационарных помех, сопутствующих измерению каждого из прогностических параметров, и в реальном масштабе времени оптимально осуществлять процедуру фильтрации всех прогностических параметров с учетом статистических свойств помех и компенсацию нестационарных помех. Для этого на этапе обучения модели фильтрации нестационарных помех необходима параллельная их регистрация и построение оптимальных оценок параметров модели связи помехи и прогностического параметра, чтобы построить оптимальные оценки параметров фильтра. Например, естественно предположить, что уровень воды в скважинах, который используется как один из прогностических параметров, связан с атмосферным давлением и количеством выпадающих осадков. Причем характер этой связи априори неизвестен, но в качестве первого приближения может приниматься линейным с чисто транспортной задержкой.

Во-вторых, на этапе обучения для совокупности прогностических параметров, отфильтрованных от нестационарных помех, например по критерию минимума дисперсий на выходе фильтра, необходимо исследовать форму и интенсивность потока сигналов в связи с происходящими событиями.

Множество параметров, таких как поток микросейсмических событий, электропроводимости горных пород, поведение уровня воды в скважинах, возмущений состояния ионосферы, изменение интенсивности эманаций радона и т. д. можно рас-

сматривать в виде векторного случайного процесса, на фоне которого необходимо выделить некоторый векторный сигнал-предвестник, параметры которого априори неизвестны, а статистические характеристики определяются на этапе обучения. Для этого необходимо отобразить пространство случайных функций-предвестников на случайное векторное пространство, что существенно облегчит набор статистик и последующий анализ прогностических параметров.

В-третьих, необходимо построить в реальном масштабе времени процедуры формального принятия решения о прогнозе, основанные на предыстории зарегистрированного векторного случайного процесса и результатах, полученных на этапе обучения, когда устанавливается статистическая связь между параметрами сигнала-предвестника и параметрами сейсмического события. Процедуры принятия решения должны включать эвристики исследователя в виде степени доверия значениям компонентов случайного процесса и стратегий линий поведения в зависимости от принятого решения.

В четвертых, такая процедура может включать оптимальное по выработанному критерию оценивание вектора параметров сигнала-предвестника с введенными в качестве эвристик исследователя априорными распределениями оцениваемых параметров и принятие решения о прогнозе с учетом формально введенной функции стоимости потерь от неверно принятого решения, а именно пропуска цели и ложной тревоги.

Пятым важным моментом является то обстоятельство, что нужно анализировать огромные объемы самой разной информации в реальном масштабе времени. Это порождает две проблемы. Первая — выделение фрагментов непрерывно поступающей информации, которые в дальнейшем рассматриваются как сигнал (задача неидентифицированного обнаружения). Вторая — измерение параметров сигнала, его идентификация как связанного с событием и накопление таких сигналов в базе данных (задача оптимальной оценки параметров потока сигналов, идентификации).

Шестым, и последним пунктом, нужно отметить собственно построение оператора прогноза, отображающего предысторию потока сигнала в вектор параметров будущего сейсмического события. Поскольку представляющие интерес для прогноза землетрясения события редкие, то естественно пойти по пути анализа предвестников и синтеза оператора прогноза на слабых сейсмических событиях с последующей экстраполяцией в область сильных землетрясений (задачи регрессии, статистической экстраполяции).

Перечисленные шесть пунктов, объединенных в единую систему, будем называть математической моделью прогноза сейсмического события.

Ниже рассмотрим проблему, связанную с первым из перечисленных пунктов в математической модели прогноза, а именно определению, если таковой существует, оператора связи между отдельными компонентами векторного процесса измерений прогностических признаков с целью выбора лишь ортогональных в выбранном смысле компонентов. Вопросы, связанные с отдельными пунктами математической модели прогноза рассмотрены в [27—29].

В этом параграфе рассматривается подход к решению первой из перечисленных в математической модели задач, а именно оценке информативности для выбранных целей различных компонентов многомерного процесса измерений геофизических полей. Предлагается следующая модель процесса: выбранные для интерпретации результаты измерений  $y_i(t)$  как функции времени образуют векторный случайный процесс  $y(t) = \{y_i(t)\}; i = 1, \dots, n; t \in \Gamma$ , где  $\Gamma$  — доступная исследователю предыстория процесса,  $n$  — количество выбранных для интерпретации параметров.

Пару компонентов  $y_i(t)$  и  $y_j(t)$  этого процесса будем считать зависимой, если подтверждается гипотеза, согласно которой для  $y_j(t)$  в выбранном классе операторов существует такой оператор  $H_{ij}(I)$ , зависящий от вектора параметров  $I$ , который, действуя на  $y_j(t)$ , дает  $y_i(t)$  с точностью до случайного процесса  $\varepsilon_{ij}(t)$ , норма которого не превосходит заданного уровня  $\varepsilon$ :

$$y_i(t) = H_{ij}(I)[y_j(t)] + \varepsilon_{ij}(t) \quad \text{и} \quad \|\varepsilon_{ij}(t)\| \leq \varepsilon. \quad (1)$$

В такой постановке задача распадается на две. Первая — это на предыстории  $\tau$  для выбранного класса операторов оптимально выбрать  $H_{ij}(I)$ . Оптимальность понимается в смысле минимума выбранной нормы случайного процесса  $\varepsilon_{ij}(t)$ :

$$\min_{I \in L} \|\varepsilon_{ij}(t)\|. \quad (2)$$

Здесь  $L$  — множество возможных значений вектора параметров  $I$ . Вторая задача — это принятие решения о зависимости или независимости компонентов путем сравнения  $\|\varepsilon_{ij}(t)\|$  с уровнем значимости  $\varepsilon$ . Решая задачу таким образом, мы не сможем выделить все зависимые компоненты, но определим зависимые в указанном смысле, т. е. для выбранного класса операторов, выбранной нормы и заданного уровня значимости  $\varepsilon$ . Поэтому важным этапом является выбор оператора, который должен охваты-

вать широкий круг преобразований вариацией вектора  $\mathbf{l}$  и выбор метрики, в которой измеряется невязка  $\varepsilon_{ij}(t)$ . Последнее обстоятельство по сути определяет эвристики исследователя относительно характера случайного процесса  $\varepsilon_{ij}(t)$ .

Рассмотрим операторы свертки, в которых ядро оператора  $h_{ij}(t)$  — это физически осуществимая функция, отличная от нуля лишь на интервале  $(0, T_{ij})$ :

$$y_i(t + \theta_{ij}) = \int_0^{T_{ij}} h_{ij}(\tau) y_j(t - \tau) d\tau + \varepsilon_{ij}(t); \\ t \in \Gamma, \quad i = 1, \dots, n; \quad T_{ij} \ll \Gamma, \quad (3)$$

где хотя бы для одной из комбинаций,  $ij$  или  $ji$ ,  $\|\varepsilon_{ij}(t)\| \leq \varepsilon..$

Из формулы (3) видно, что ядро интегрального оператора свертки  $h_{ij}(t)$  зависит от  $T_{ij}$ , а именно, отличается от нуля лишь на интервале  $(0, T_{ij})$ .

Из того, что модель (1) выполняется для комбинации  $ij$ , не следует, что она обязательно будет выполняяся и для  $ji$ . Это связано с тем обстоятельством, что обратный оператор к (1) может не существовать. Решение будем искать в виде:

$$h_{ij}(t) = \sum_{s=1}^m h_{ijs} \varphi_s(t, T_{ij}). \quad (4)$$

Здесь  $\varphi_s(t, T_{ij})$  — базисные и отличные от нуля на интервале  $(0, T_{ij})$  функции. В (1) вектор параметров  $\mathbf{l}$ , определяющий оператор, представляет собой  $\mathbf{l} = \{h_{ij}, T_{ij}, \theta_{ij}\}$ . Задача сводится к определению вектора  $\mathbf{h}_{ij} = \{h_{ijs}\}$ , задержки  $\theta_{ij}$  и носителя базисных функций  $T_{ij}$ , минимизирующих  $\|\varepsilon_{ij}(t)\|$ . Отметим, что  $\mathbf{h}_{ij}$  входит в модель линейно, а  $\theta_{ij}$  и  $T_{ij}$  — нелинейно. Последнее обстоятельство определяет путь вычисления компонентов вектора  $\mathbf{l}$ . Например, для гипотезы о том, что  $\varepsilon_{ij}(t)$  — белый шум, оптимальные оценки вектора  $\mathbf{h}_{ij}$  при условии фиксированных значений  $\theta_{ij}$  и  $T_{ij}$  находятся из системы линейных уравнений [9]

$$\Psi_{ij}(T_{ij}) \mathbf{h}_{ij} = \mathbf{I}_{ij}(T_{ij}, \theta_{ij}). \quad (5)$$

В этом выражении матрица

$$\Psi_{ij}(T_{ij}) = [\psi_{ijk}(T_{ij})]_{k,s=1, \dots, m} \quad (6)$$

состоит из элементов

$$\psi_{ijk}(T_{ij}) = \int_0^\Gamma \int_0^{T_{ij}} \int_0^{T_{ij}} y_j(\tau) \varphi_k(t - \tau) \varphi_s(t - \sigma) y_j(\sigma) d\tau d\sigma dt. \quad (7)$$

Вектор в правой части

$$\mathbf{I}_{ij}(T_{ij}, \theta_{ij}) = [I_{ijs}(T_{ij}, \theta_{ij})]_{s=1, \dots, m}$$

состоит из компонентов

$$I_{ijs}(T_{ij}, \theta_{ij}) = \int_0^\Gamma \int_0^{T_{ij}} y_j(t + \theta_{ij}) \varphi_s(t - \tau) y_j(\tau) d\tau dt. \quad (8)$$

Вектор  $\mathbf{h}_{ij}(0, T_{ij})$ , удовлетворяющий уравнению (5), будет оптимальным при условии фиксированных значений  $\theta_{ij}$  и  $T_{ij}$ . Если  $\Theta_{ij}$  и  $T_{ij}$  — множество возможных значений соответственно  $\theta_{ij}$  и  $T_{ij}$ , то процедура поиска глобального минимума (2) заключается в том, что для выбираемых перебором нелинейных параметров  $\theta_{ij}$  и  $T_{ij}$  из  $\Theta_{ij}$  и  $T_{ij}$  линейно входящие параметры  $\mathbf{h}_{ij}$  находятся решением системы уравнений (5). Такой подход уместен при небольшой размерности нелинейно входящих в модель параметров и достаточно большой размерности вектора линейно входящих параметров.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

Включение в программы, подобные программе «Предупреждение», анализа сейсмической опасности комплексных наземных и космических геофизических наблюдений на Крымском и Карпатском регионах существенно повысит надежность прогноза землетрясений на территории Украины. Кроме того, появляются возможности детального исследования природы геомагнитных аномалий в ионосфере, предшествующих сильным землетрясениям. Комплекс наблюдений на полигонах включает долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные предвестники. Также необходимо совершенствование математического обеспечения автоматизированной системы мониторинга геофизических полей, включая и данные, получаемые в космосе.

С точки зрения повышения надежности прогноза, в комплекс наземных исследований рекомендуется включить: изучение закономерностей миграции слабых толчков к месту развития магистрального разрыва; анализ отношения скоростей и амплитуд продольных и поперечных волн; наклономерные наблюдения; анализ длиннопериодных вариаций геомагнитного поля; наблюдения электромагнитного излучения; изучение природы аномалий; гидро-геохимические наблюдения.

В процессе исследований предполагается существенно развить теорию наблюдаемых явлений. Одной из важных проблем комбинирования космических и наземных наблюдений является передача и совместная обработка геофизической информации в единой системе мониторинга.

1. Абдуллабеков К. Н. Электромагнитные явления в земной коре. — Ташкент: Фан, 1989.—232 с.
2. Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1992.—192 с.
3. Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1993.—239 с.
4. Геодинамические исследования в Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1995.—210 с.
5. Голиков Ю. В., Д'Коста, Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации, возбуждаемые при сильных землетрясениях // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25.—С. 824—828.
6. Исследование геодинамических процессов на территории УССР: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1989.—122 с.
7. Коцаренко М. Я., Корепанов В. Е., вченко В. М. Дослідження іоносферних провісників землетрусів (експеримент «Попередження») // Косміч. наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 96—99.
8. Кузнецова В. Г. Изучение геодинамических процессов и предвестников землетрясений в Карпатах на основе тектономагнитных исследований // Прогноз землетрясений. — Душанбе—Москва: Доныш, 1986.—Вып. 7.—С. 219—233.
9. Мостовой С. В. Оптимальные оценки параметров геофизических полей. — К.: Наук. думка, 1987.—195 с.
10. Мостовой С. В., Мостовой В. С., Осадчук А. Е. Мониторинг сейсмоопасных зон и экологически опасных объектов с целью прогноза риска // Геофиз. журн.—1995.—15, № 2.—С. 269—275.
11. Развитие сейсмопрогностических исследований на Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1984.—179 с.
12. Рахимов И. А., Ризаев К. И., Ханбердиев А. и др. Волновые возмущения электронного содержания ионосфера в период повышенной сейсмической активности. Ионосферные эффекты землетрясений. — Ашхабад, 1991.—С. 14—15.
13. Сагалова Е. А. Реализация долговременного прогноза в зоне Вранча // Геофиз. журн.—1987.—9, № 6.—С. 84—89.
14. Сейсмическое районирование территории СССР. — М: Наука, 1980.—307 с.
15. Сейсмопрогностические исследования на территории УССР (Сб. науч. тр.): — Киев: Наук. думка, 1988.—152 с.
16. Современная геодинамика и прогноз землетрясений на Украине: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1985.—100 с.
17. Современные геодинамические процессы и их изучение в связи с проблемой прогноза землетрясений: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1986.—92 с.
18. Современные геодинамические процессы и прогноз: (Сб. науч. тр.). — Киев: Наук. думка, 1987.—96 с.
19. Харин Е. П. Изменчивость передаточных функций электромагнитного поля Земли во времени // Геофиз. журн.—1981.—3, № 3.—С. 16—23.
20. Харин Е. П., Кузнецова В. Г., Городынский Ю. М., Максимчук В. Е. Особенности временных изменений передаточных функций геомагнитного поля в Закарпатье // Геофиз. журн.—1996.—18, № 3.—С. 76—83.
21. Харитонов О. М., Костюк О. П., Кутас В. В. и др. Сейсмичность территории Украины // Геофиз. журн.—1996.—18, № 1.—С. 3—15.
22. Chmurev V. M., Isaev N. V., Bilichenko S. V., Stanev G. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an Earthquake centre // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 100—109.
23. Davies, Baker D. M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964 // J. Geophys. Res.—1965.—70, N 9.—P. 2251—2253.
24. Gokhberg M. B., Gufeld I. L., Rozhnov A. A. et al. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere waveguide // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 64—67.
25. Korepanov V., Kuznetsova V., Maksymchuk V. Tectonomagnetic Investigations as ground support of space earthquake prediction experiment // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. — Tokyo: Terrapub, 1994.—P. 489—491.
26. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A. et al. Some Statistical Results on very low frequency radiowave emission in the upper ionosphere over Earthquake zones // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57.—P. 100—109.
27. Mostovoy S., Mostovoy V. Seismic signal analysis and prediction the seismic events // Consel de l'Europe: Journees Luxembourggeoises de Jeodynamique (79th and 80th session). — Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffore, 1996.—P. 40—45.
28. Mostovoy S. V., Mostovoy V. S., Osadchuk A. E. The monitoring system of ecological hazard objects // Inform. theories & application.—1996.—4, N 3.—P. 34—40.
29. Mostovoy S., Osadchuk A. Seismic dangerous areas and ecological dangerous objects // Consel de l'Europe: Journees Luxembourggeoises de Jeodynamique (79th and 80th session). — Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffore 1996.—P. 20—28.
30. Warwick J. W. Radioastronomical techniques for the study of planetary atmospheres // Radioastronomical and satellite studies of the atmosphere / Ed. J. Aarons. — Amsterdam: North Holland, 1963.—P. 400.

#### GROUND-BASED OBSERVATIONS FOR PREDICTING SEISMIC EVENTS AND TECHNIQUES FOR THEIR PROCESSING AND ANALYSIS TOGETHER WITH THE DATA OF IONOSPHERE MONITORING FROM SPACE

S. Mostovoy, V. Starostenko, O. Kharitonov

Procedure of processing ground-based and space measurements of geophysical fields for the purpose of predicting earthquakes is considered. Much attention is given to the processing and analysis of those fields forerunners of seismic events were detected earlier. A mathematical model of earthquake prediction is suggested. Detection of forerunners is regarded as a problem of detecting a forerunner signal on the background of a multidimensional stochastic process which is represented by measurements of geophysical fields in the ionosphere and on the Earth's surface.

УДК 621.7

# Газоструйний имитатор ВУФ- и УМР-излучения Сонця и воздействие его излучения на материалы

Э. Т. Верховцева, В. И. Яременко, В. Д. Телепнев

СКТБ по КТ Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 23.03.98*

В роботі представлені конструкція, спектральні, енергетичні і експлуатаційні характеристики унікального імітатора вакуумного ультрафіолетового (ВУФ) і ультрам'якого рентгенівського (УМР) випромінювання Сонця, що перекриває діапазон довжин хвиль від 5 до 170 нм. Імітатор призначено для лабораторного моделювання впливу сонячного ВУФ- і УМР-випромінювання на матеріали космічної техніки, а також для наземних випробувань космічних апаратів та їх систем. Фізичний принцип роботи імітатора полягає у збудженні електронним пучком надзвукового струменю суміші газів, яка витікає в вакуумну камеру. Газовий струмінь відкачується кріогенним насосом та іншими засобами відкачки. Імітатор дозволяє вводити ВУФ- і УМР-випромінювання через відкритий отвір у високовакуумну камеру ( $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Па) у великому тілесному куті і опромінювати об'єкти великих площин. Опроміненість об'єкта, утворювана імітатором, може в 10 разів перевищувати сонячну опроміненість об'єкта на навколоземній орбіті. Наведені приклади впливу випромінювання газоструменевого імітатора на фізико-механічні і триботехнічні характеристики деяких матеріалів космічної техніки.

## ВВЕДЕНИЕ

Для получения информации о возможности деградации материалов в космосе необходимо более полно моделировать комплексное воздействие факторов космической среды на материалы при наземных имитационных испытаниях. Настоящая статья посвящена имитации одного из факторов космоса — вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и ультра-мягкого рентгеновского (УМР) излучения Солнца (интервал длин волн  $\lambda\lambda 5$ — $170$  нм), который отсутствует в подавляющем большинстве современных имитационных стендов. Хотя доля энергии ВУФ- и УМР-излучения Солнца в области спектра 5— $170$  нм очень мала —  $2.5 \cdot 10^{-2}$  Вт/ $m^2$  [13, 14] при суммарной энергии  $1.4 \cdot 10^3$  Вт/ $m^2$ , однако благодаря большой энергии квантов (7.3—248 эВ) его воздействие на различные материалы может привести к

заметным изменениям их физических свойств. Кванты таких энергий могут производить фотоионизацию и фотодиссоциацию любых молекул, входящих в состав различных твердых тел. Кроме того, поскольку глубина проникновения ВУФ- и УМР-излучения в различных материалах очень мала ( $10^{-3}$ — $10^{-7}$  см), годовая доза поглощенной энергии в тонком поверхностном слое может быть значительной. Для полимеров это обстоятельство будет приводить к сильным фотохимическим превращениям в тонком слое и, как следствие, к значительному выделению газообразных продуктов ВУФ-фотолиза, уменьшению толщины пленочных материалов и фототравлению поверхности. Изменение микрорельефа и микроструктуры тонких поверхностных слоев при фототравлении вызывает, в свою очередь, изменение оптических и физико-механических свойств материалов.

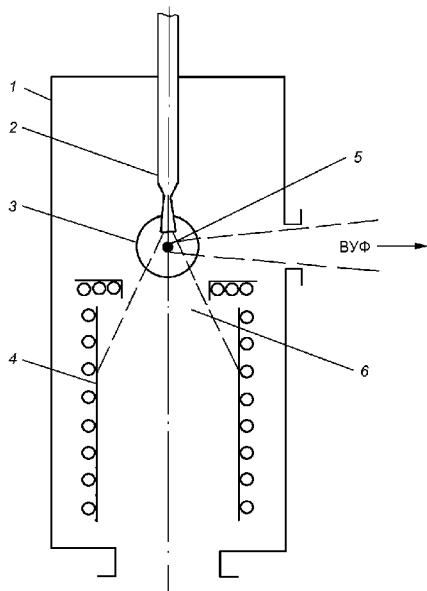


Рис. 1. Схема имитатора с криогенной откачкой струи рабочего газа: 1 — вакуумная камера, 2 — сверхзвуковое сопло, 3 — электронная пушка, 4 — криогенный насос, 5 — электронный пучок (ось пучка перпендикулярна к плоскости рисунка), 6 — сверхзвуковая струя

В связи с вышеизложенным возникла необходимость в создании имитатора ВУФ- и УМР-излучения Солнца для моделирования воздействия этого излучения на материалы, космические аппараты и их системы в имитационных стендах. Соответственно своему назначению имитатор должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- распределение энергии его излучения в области спектра 5—170 нм должно быть близким к распределению энергии излучения Солнца;
- принцип работы и конструкция должны быть таковы, чтобы в достаточно большом телесном угле, без окон, вводить ВУФ- и УМР-излучение из имитатора в камеру с высоким вакуумом, где расположен облучаемый объект;
- никакие другие частицы, кроме фотонов, не должны при этом попадать из имитатора на поверхность облучаемого объекта;
- с целью имитации длительного воздействия солнечного излучения на материалы необходимо, чтобы поток энергии излучения имитатора превышал солнечный;
- имитатор должен работать в непрерывном режиме достаточно продолжительное время.

Обзор существующих методов получения электромагнитного излучения ВУФ-диапазона дан в книге

[7]. Проведенный анализ свойств существующих источников ВУФ- и УМР-излучения показал, что ни один из них не удовлетворяет сформулированным выше требованиям [5]. Если для области спектра  $\lambda\lambda$  110—200 нм в качестве имитатора солнечного излучения может с успехом применяться водородная лампа с окном из LiF, то для длин волн  $\lambda < 110$  нм создание имитатора связано с большими трудностями. Главными из них являются ввод ВУФ- и УМР-излучения в большом телесном угле через открытые отверстия в камеру со сверхвысоким вакуумом без попадания посторонних частиц из имитатора, а также моделирование солнечного распределения энергии излучения.

Поэтому для решения поставленной выше задачи оказалось целесообразным не усовершенствование уже существующих источников, а разработка имитатора на новом физическом принципе, основанном на возбуждении сверхзвуковой струи смеси газов, вытекающей в вакуум, плотным электронным пучком. В следующем разделе дано подробное описание газоструйного метода получения электромагнитного излучения, впервые предложенного и реализованного во ФТИИТ НАН Украины [2].

#### ГАЗОСТРУЙНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Суть метода заключается в возбуждении электронами газа, вытекающего в вакуумную камеру в виде ограниченной в пространстве струи, с последующей откачкой газа вакуумными насосами. При этом можно получать электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн, включающем УМР- и ВУФ-области спектра, ближнюю УФ-область, видимую и ИК-области спектра. Уникальный по своим возможностям метод позволяет:

- вводить излучение в высокий вакуум без окон или системы дифференциальной откачки. Эта особенность очень важна для труднодоступных ВУФ- и УМР-областей спектроскопии, для которых не существует механически прочных прозрачных материалов и необходимо вакуумирование всего канала распространения излучения;
- получать излучение не только свободных атомов или молекул, но и их комплексов — кластеров разных размеров от димеров до микрокристаллов;
- вызывать колебательно-вращательное возбуждение молекул, а также последовательное возбуждение электронных оболочек атомов от ва-

лентной до внутренней К-оболочки при изменении энергии электронов от единиц электрон-нвольт (в плазме ВЧ-разряда) до тысяч электронвольт (в электронном пучке).

Благодаря отмеченным выше особенностям газоструйный метод является уникальным для моделирования электромагнитного излучения источников космического пространства и верхней атмосферы Земли.

В настоящее время на базе этого метода созданы:

- имитатор ИК-излучения верхней атмосферы Земли в диапазоне длин волн 2—20 мкм на разных высотах;
- имитатор ВУФ- и УМР-излучения Солнца в диапазоне  $\lambda\lambda$  5—170 нм.

### КОНСТРУКЦИЯ ИМИТАТОРА

Схемы имитаторов, в которых реализован газоструйный метод получения ВУФ- и УМР-излучения, представлены на рис. 1—3. Рабочий газ через сверхзвуковое сопло вытекает в вакуумную камеру, образуя ограниченную в пространстве направ-

ленную сверхзвуковую струю. Давление газа в струе составляет около  $10^2$  Па, в то время как вблизи струи давление газа  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Па. Электронная пушка формирует электронный пучок, пересекающий струю перпендикулярно к ее оси. Возникающее в месте взаимодействия электронов с газом ВУФ- и УМР-излучение выводится через открытое отверстие в камеру с облучаемым объектом с давлением газа  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Па. Спектр и интенсивность излучения имитатора определяются рабочим газом, давлением и температурой газа на входе в сопло, а также энергией и током электронного пучка.

К настоящему времени созданы имитаторы трех типов, отличающихся способами откачки рабочего газа струи.

1. Криогенный вариант прибора, в котором поступающий в вакуумную камеру рабочий газ откачивается криогенным конденсационным насосом при температуре 20—25 К. Схематическое изображение этого варианта прибора представлено на рис. 1. Криогенные методы откачки рабочего вещества струи использовались, как правило, в первых разработках прибора, что было обусловлено следу-

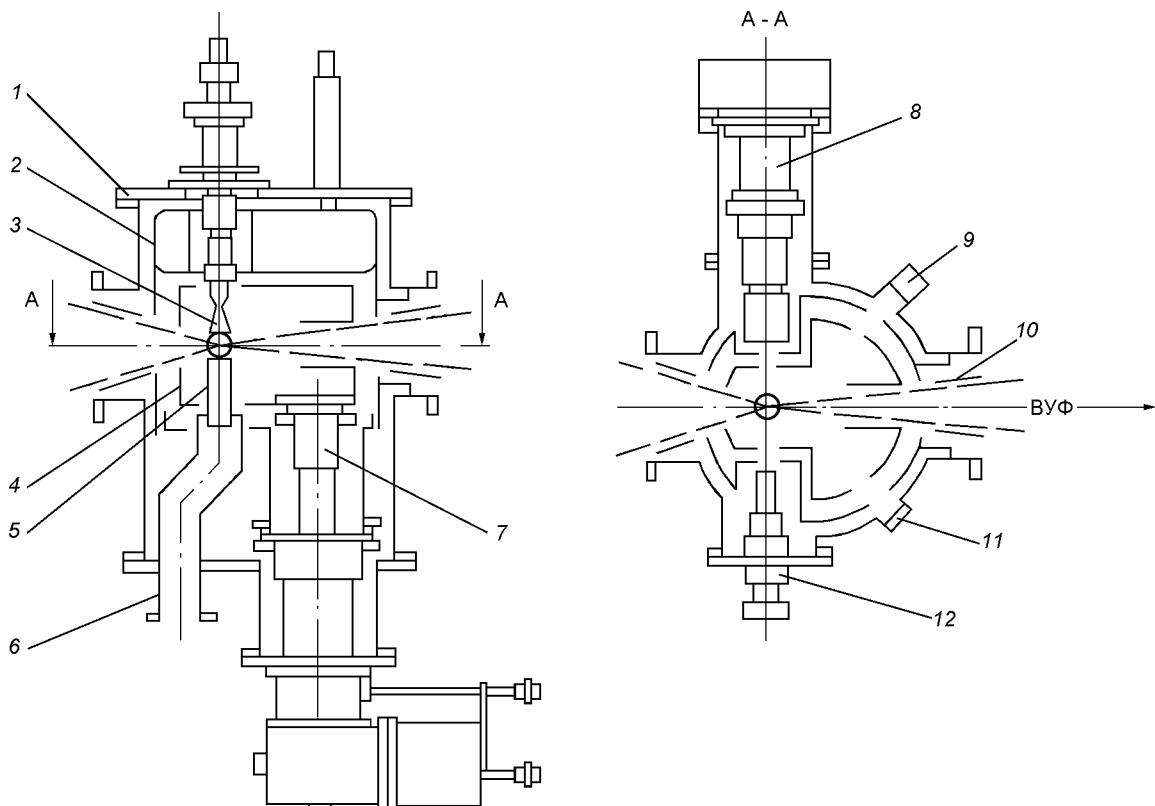


Рис. 2. Схема имитатора с комбинированной откачкой струи рабочего газа: 1 — вакуумная камера, 2 — экран 80 К, 3 — сверхзвуковое сопло, 4 — экран 20 К, 5 — патрубок, 6 — трубопровод откачки двухроторным насосом, 7 — головка холодильной машины, 8 — электронная пушка, 9 — индикатор излучения, 10 — электрический фильтр, 11 — окно, 12 — коллектор электронов

ющей причиной. В рабочем режиме имитатора поток газа в струе составляет около  $3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для поддержания в камере имитатора вакуума  $10^{-3} \text{ Па}$  при указанном потоке газа необходимо использовать насосы с очень большой производительностью ( $3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Большую скорость откачки при относительно небольших габаритах могут обеспечить криогенные конденсационные насосы. Однако время непрерывного цикла работы имитатора при этом ограничено. Детальное описание одной из конструкций криогенного варианта имитатора содержится в работе [6]. Криогенный вариант имитатора с гелиевым конденсационным насосом [9] используется в испытательном стенде КИФК в Физико-техническом институте низких температур НАН Украины [1].

2. Комбинированный вариант прибора, в котором применена комбинированная система откачки рабочего газа: основной поток газа (97 %) откачивается через специальный патрубок механическими насосами, а рассеянный от сопла и патрубка газ (3 %) вымораживается на поверхности криогенного конденсационного насоса. Схема прибора, созданного на базе западно-европейской техники для испытательного имитационного стенда КОВЕ (ФРГ), представлена на рис. 2. В комбинированном варианте прибора, в отличие от криогенного, сверхзвуковая струя газа поступает в патрубок 5 и откачивается через трубопровод 6 двухроторным насосом с производительностью  $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Использование механического двухроторного насоса стало возможным благодаря тому, что сверхзвуковой поток газа в патрубке является своеобразным «газовым затвором» между областью с давлением  $10^{-2}—10^{-3} \text{ Па}$ , где формируется и возбуждается электронным пучком сверхзвуковая струя газа, и трубопроводом 6 с давлением в несколько десятков паскалей. Откачка рассеянных потоков осуществляется экраном 4, который служит криогенным конденсационным насосом. Экран находится в тепловом контакте с низкотемпературной (второй) ступенью головки гелиевой холодильной машины 7 и охлаждается до температуры 20 К. Для уменьшения тепловой нагрузки на криогенный конденсационный насос применен экран 2, имеющий температуру 80 К. Поскольку рассеянные потоки составляют 3 % от общего расхода газа, то в данной конструкции время непрерывной работы конденсационного насоса, а следовательно и имитатора, значительно увеличивается по сравнению с криогенным вариантом прибора.

Для формирования сверхзвуковой струи газа используется коническое сопло 3. На расстоянии 3.5 мм от среза сопла струя пересекается электронным пучком с энергией 1 кэВ. Электронная пушка

8 располагается на расстоянии 45 мм от оси струи. Ток электронного пучка измеряется коллектором 12.

Излучение из камеры имитатора вводится в камеру стенда КОВЕ через диафрагму с апертурным углом  $11^\circ$ . Для исключения попадания заряженных частиц из имитатора на облучаемые объекты на пути распространения ВУФ- и УМР-излучения установлен электрический фильтр 10, отклоняющий заряженные частицы за пределы потока излучения.

Для контроля за работой имитатора камера 1 имеет два окна. Окно 11 служит для визуального наблюдения светящейся струи, а на втором окне устанавливается индикатор излучения 9, контролирующий стабильность излучения имитатора. В рабочем режиме имитатора давление газа на входе в сопло равно 0.18 МПа, температура 293 К, а поток газа в струе составляет  $3.5 \text{ м}^3/\text{с}$ . При таком потоке газа давление в камере имитатора составляет  $6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ , а в вакуумной камере с облучаемым объектом стенда КОВЕ (с производительностью откачки средств  $2.2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) —  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ .

3. Бескриогенный вариант прибора, в котором рабочий газ струи, а также рассеянные из сопла и патрубка потоки газа откачиваются двухроторными и турбомолекулярными насосами. Схематическое изображение основных элементов конструкции этого прибора, созданного для испытательного стенда

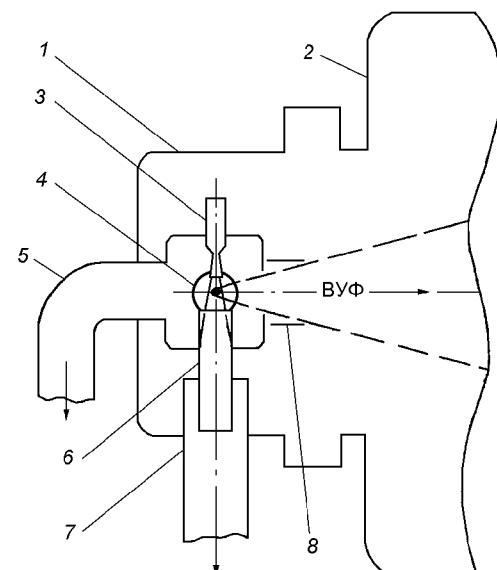


Рис. 3. Схема имитатора с бескриогенной откачкой струи рабочего газа: 1 — форкамера, 2 — вакуумная камера, 3 — сверхзвуковое сопло, 4 — электронная пушка (ось пушки перпендикулярна к плоскости рисунка), 5 — трубопровод откачки двухроторным насосом ( $0.15 \text{ м}^3/\text{с}$ ), 6 — патрубок, 7 — трубопровод откачки двухроторным насосом ( $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$ ), 8 — электрический фильтр

ТВУ-100Г (ИКИ РАН, Россия), представлено на рис. 3. Имитатор размещается в форвакуумной камере 1 испытательного стенда. Основной поток газа в имитаторе откачивается через патрубок двухроторным насосом с производительностью  $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$ , а рассеянные потоки газа откачиваются двухроторным насосом со скоростью откачки  $0.15 \text{ м}^3/\text{с}$ . ВУФ- и УМР-излучение из камеры имитатора вводится в высоковакуумную камеру 2 стендса через диафрагму с апертурным углом  $24^\circ$ . На пути распространения ВУФ- и УМР-излучения установлен электрический фильтр 8, предотвращающий попадание заряженных частиц на образец. В

рабочем режиме имитатора давление в камере испытательного стенда не превышает  $2.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  при откачке турбомолекулярными насосами с суммарной скоростью откачки  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА В ОБЛАСТИ СПЕКТРА 5—170 нм

Важным этапом создания имитатора явилось определение режима работы, при котором распределение энергии излучения максимально приближено к солнечному в интервале длин волн 5—170 нм. В

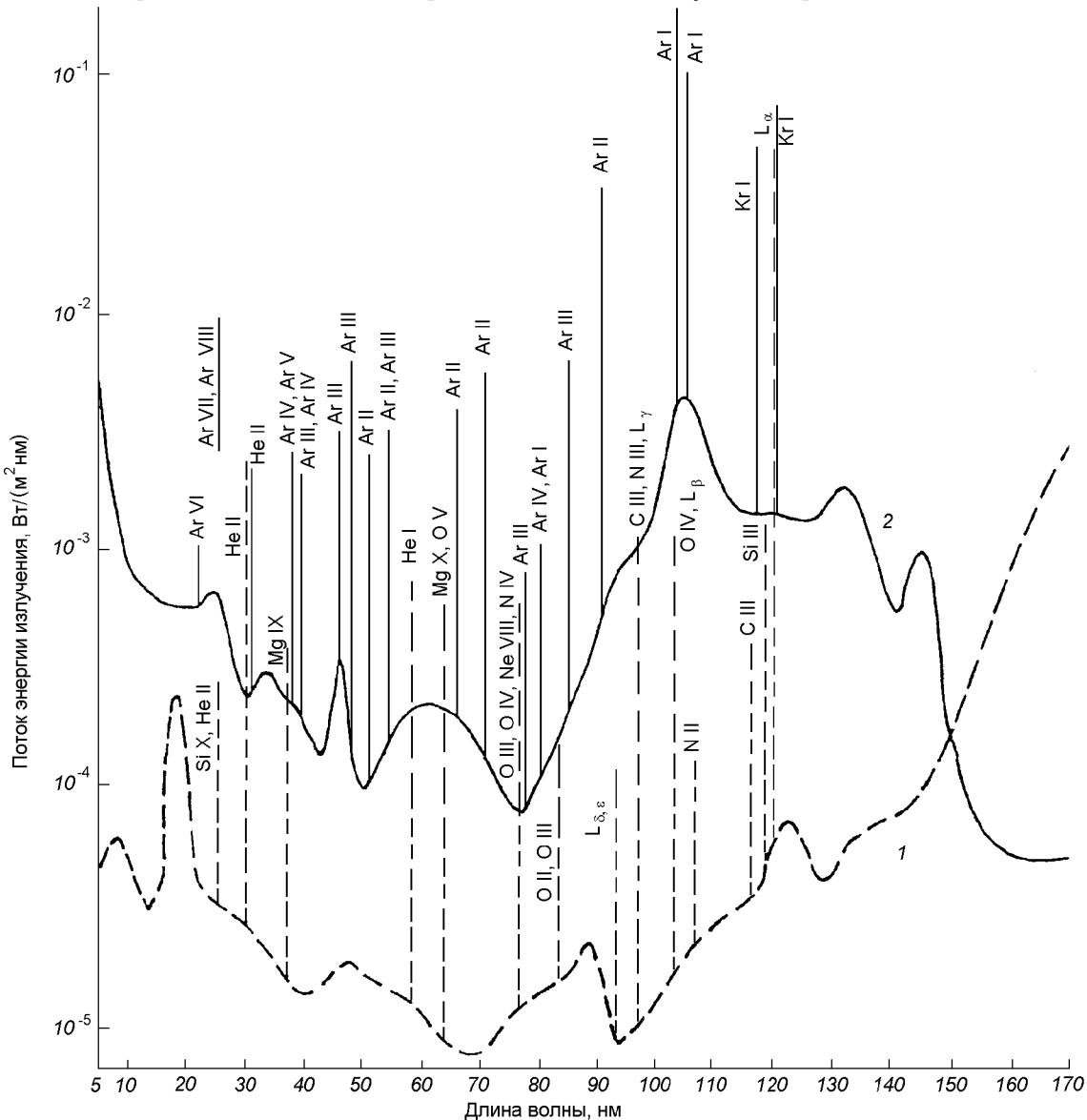


Рис. 4. Спектр Солнца на среднем расстоянии от Земли [13, 14] (кривая 1) и спектр струи смеси газов  $\text{Ar} + 0.5\% \text{ He} + 0.1\% \text{ Kr}$  на расстоянии 0.7 м от оси струи при токе электронного пучка 24 мА с энергией электронов 1 кэВ, потоке рабочего газа  $3.5 \text{ м}^3/\text{Pa}/\text{с}$  (кривая 2)

Поток энергии излучения Солнца и имитатора на отдельных участках спектра в диапазоне 5—170 нм

$\lambda\lambda$ , нм	Поток энергии излучения, Вт/м <sup>2</sup>	
	Солнце [13, 14]	Газоструйный имитатор
170—160	0.011	0.0005
160—150	0.004	0.001
150—140	0.001	0.008
140—130	0.0005	0.015
130—120	0.0051	0.026
120—110	0.0003	0.019
110—100	0.0003	0.064
100—90	0.0002	0.011
90—80	0.0003	0.003
80—70	0.0001	0.002
70—60	0.0001	0.003
60—50	0.0002	0.004
50—40	0.0001	0.006
40—30	0.0005	0.005
30—20	0.0004	0.010
20—10	0.001	0.011
10—5	0.0004	0.021
170—5	0.0252	0.21

первых вариантах имитатора солнечное распределение энергии моделировалось в области 50—150 нм [4], затем в диапазоне 10—170 нм [12] и в настоящей работе — в интервале 5—170 нм. Подробное описание градуировки спектральной аппаратуры и методики измерений содержится в работах [4, 11].

На рис. 4 (кривая 1) по данным работ [13, 14] представлено распределение солнечной энергии в спектральном диапазоне 5—170 нм для спокойного Солнца вблизи среднего уровня его активности: все слабые линии включены в фон; линии, интенсивность которых значительно превышает фон, выделены; близкие линии совмещены, ордината вершины относится к их сумме. Приведенное на рисунке распределение энергии излучения дополняется таблицей. Во втором столбце таблицы даны абсолютные значения потока солнечного излучения за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Земли до Солнца. Представленные для области спектра 5—130 нм данные [14] отличаются от данных, полученных ранее и позже, примерно в два раза на отдельных участках спектра. Величины потоков, приведенные для диапазона длин волн 130—170 нм [13] определены с погрешностью, не превышающей 150 %.

Проведенные исследования распределения энергии излучения в ВУФ- и УМР-спектрах струй различных смесей газов показывают, что ближе к солнечному подходит распределение энергии излу-

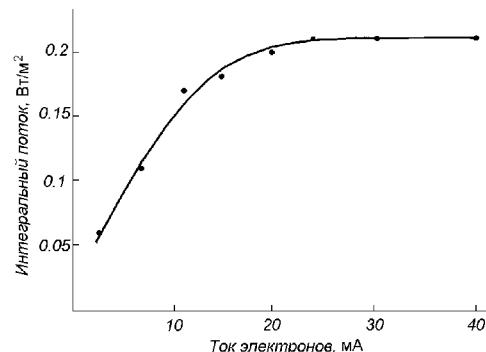


Рис. 5. Зависимость интегрального потока излучения имитатора в области спектра 5—170 нм от тока электронного пучка при энергии электронов 1 кэВ

чения в спектре струи смеси Ar + 0.5 % He + + 0.1 % Kr. Кривая 2 на рис. 4 и значения в третьей графе таблицы показывают спектральное распределение энергии излучения имитатора на расстоянии 0.7 м от струи при потоке рабочего газа 3.5 м<sup>3</sup> Па/с, токе электронного пучка 24 мА и энергии электронов 1 кэВ.

На рис. 5 представлен график зависимости интегрального потока энергии излучения имитатора в области 5—170 нм от тока электронного пучка. Из анализа данных рис. 5 и таблицы следует, что на расстоянии 0.7 м от оси струи отношение облученности на объекте к облученности, создаваемой Солнцем на околоземной орбите может изменяться в пределах от 2 до 10 раз. Нестабильность облученности за время непрерывного цикла работы имитатора составляет 14 %.

#### ВОЗДЕЙСТВИЕ ВУФ И УМР ИЗЛУЧЕНИЯ ИМИТАТОРА НА МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В последнее время вследствие осознания роли ВУФ- и УМР-излучения Солнца в воздействии на материалы космической техники наметился рост исследований в этой области [15]. Представим некоторые результаты, полученные с использованием ВУФ-излучения газоструйного имитатора. Более полные сведения по данному вопросу содержатся в работах [3, 8, 10].

На рис. 6 представлены в виде диаграммы результаты исследований влияния ВУФ-излучения имитатора на работоспособность твердых смазочных покрытий (ТСП) в вакууме [3]. Облучение образцов ТСП проводилось в вакууме 10<sup>-3</sup> Па при температуре образцов 50 К до энергетических экспозиций, соответствующих 80 и 300 ч пребывания

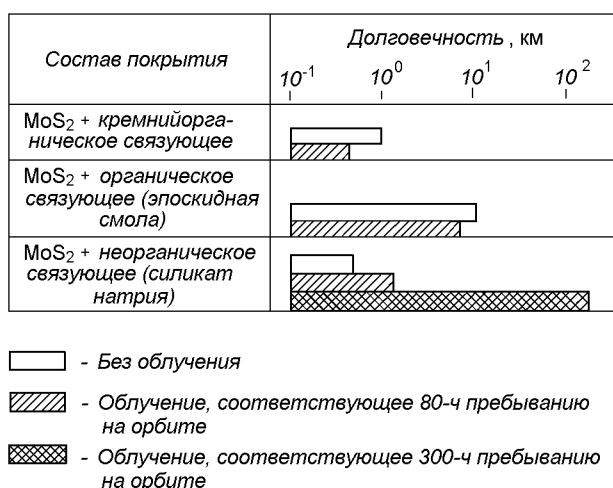


Рис. 6. Влияние ВУФ-облучения на долговечность твердых смазочных покрытий в вакууме [3]

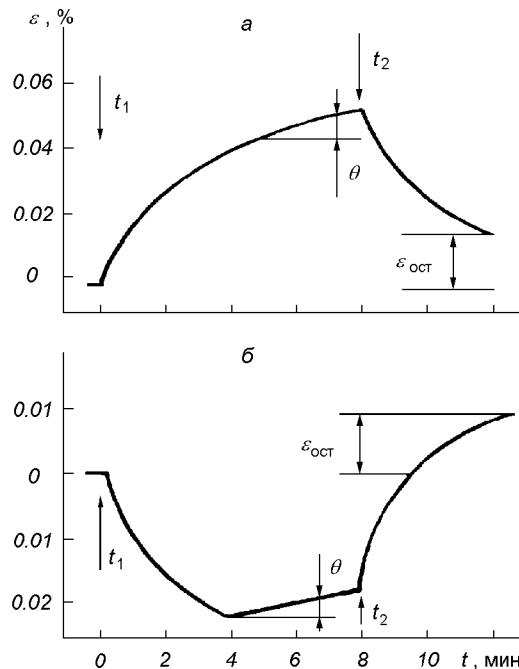


Рис. 7. Зависимость деформации от времени облучения (в интервале  $t_1 \leq t \leq t_2$ ) и последующая релаксация деформации при прекращении облучения (в интервале  $t > t_2$ ): а — полиэтилен; б — резина [10]

на орбите. Триботехнические испытания проводились на установке УТИ-1 по схеме «сфера-плоскость» при следующих условиях: давление  $10^{-5}$  Па; скорость скольжения 0.82 м/с; удельная нагрузка 176 кг/мм<sup>2</sup>; температура 293 К. Показано, что предварительное (до начала трения) ВУФ-облуче-

ние оказывает неоднозначное влияние на триботехнические характеристики ТСП со связующими различной природы в вакууме. Коэффициент трения практически не зависит от воздействия ВУФ-облучения, однако долговечность ТСП с кремнийорганическим и органическим (эпоксидная смола) связующими уменьшается, а с неорганическим связующим (силикат натрия) — наоборот — значительно увеличивается. При этом эффект повышения долговечности ТСП тем больше, чем длительнее ВУФ-облучение.

В качестве другого примера на рис. 7 демонстрируется влияние ВУФ-облучения на ползучесть полимеров: полиэтиленовой пленки толщиной 0.04 мм (а) и резиновой пленки толщиной 0.07 мм (б). Образцы облучались в высоковакуумной камере с давлением  $10^{-4}$  Па в спектральной области 50—150 нм интегральным потоком энергии  $5 \cdot 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>. Деформация производилась при постоянной нагрузке 3.9 МПа для полиэтилена и 0.44 МПа для резины. Облучение включалось в момент времени  $t_1$  при насыщении временной зависимости деформации. Как следует из рис. 7, облучение вызывает дополнительную деформацию, положительную для полиэтилена и отрицательную для резины. При прекращении облучения деформация релаксирует к ненулевому, остаточному уровню  $\varepsilon_{\text{ост}}$ .

Рассмотренные в данной статье конструкции газоструйных источников излучения, основанные на использовании газоструйного метода получения электромагнитного излучения, позволяют в наземных лабораторных условиях имитировать коротковолновое излучение Солнца в ВУФ- и УМР-диапазонах спектра. Приведенные примеры использования имитаторов подтверждают эффективность воздействия излучения этих диапазонов спектра на материалы космической техники.

1. Абраимов В. В., Негода А. А., Завалишин А. П., Колыбаев Л. К. Комплексная имитация факторов космического пространства // Косміч. наука і технологія.—1995.—1, № 2–6.—С. 76–78.
2. А. с. 1278611 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 J 3/10. Способ получения спектров излучения инертных газов в вакуумной ультрафиолетовой области / Э. Т. Верховцева, Е. А. Бондаренко, Ю. С. Доронин. — Опубл. 07.08.86, Бюл. № 47.
3. Веркин Б. И., Верховцева Э. Т., Курилов Г. В. и др. Влияние ВУФ-излучения на твердосмазочные покрытия // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. Сб. тр. — Харьков: Физ.-техн. ин-та низких температур АН УССР, 1972.—С. 39—41.
4. Верховцева Э. Т., Кравченко А. В., Оська В. С., Фогель Я. М. Моделирование распределения энергии излучения Солнца в области спектра 500—1500 Е // Космич. исслед.—1970.—8, вып. 1.—С. 140—145.
5. Верховцева Э. Т., Яременко В. И. О возможности использования источников вакуумного ультрафиолетового излуче-

- ния в целях космического материаловедения // Космич. исслед. на Украине.—1973.—Вып. 3.—С. 66—80.
6. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Погребняк П. С., Овчинин А. Е. Малогабаритный вариант газоструйного источника вакуумного ультрафиолета // Приборы и техн. эксперимента.—1976.—№ 4.—С. 210—212.
  7. Зайдель А. Н., Шрейдер Е. Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. — М.: Наука, 1976.—431 с.
  8. Карин М. Г., Сидорин К. К., Шестаков И. Б. Изменение оптических свойств карбидов переходных металлов под воздействием ВУФ облучения // VIII Всесоюз. конф. по физике ВУФ-излучения и взаимодействию излучения с веществом: Тр. конф. — Иркутск, 1989.—Т. 1.—С. 147—148.
  9. Стрельников В. П., Телепнев В. Д. Малогабаритный гелиевый конденсационный насос для откачки сверхзвуковой струи газа // Приборы и техн. эксперимента.—1978.—№ 4.—С. 254—255.
  10. Строилов В. С., Бочаров К. Ш., Удовенко В. Ф. Влияние ВУФ излучения на ползучесть полимеров // Всесоюз. семинар по физике ВУФ-излучения и взаимодействию излучения с веществом: Тр. семинара. — Л., 1978.—С. 207—209.
  11. Ткаченко А. А., Гнатченко Е. В., Верховцева Э. Т. Определение интенсивности поляризационного тормозного излучения в ультрамягкой рентгеновской области спектра в абсолютных единицах // Журн. техн. физики.—1995.—64.—С. 136—141.
  12. Bondarenko E. A., Verkhovtseva E. T., Gnatchenko E. V. et al. Simulation of solar VUV and soft X-ray radiation // IVth Intern. conf. on Laboratory Research for Planetary Atmospheres: Program of Invited Papers and Contributed Posters. — Munich, 1992.—P. 26.
  13. Detwiler C. R., Garrett D. L., Purcell J. D., Tousey R. The intensity distribution in the ultraviolet solar spectrum // Ann. geophys. AEEPA.—1961.—17, N 3.—P. 9—18.
  14. Hinteregger H. E., Hall L. A. and Schmidtke G. Solar XUV radiation and neutral particle distribution in July 1963 thermosphere // Space Res.—1965.—V.—P. 1175—1190.
  15. Materials in Space Environment: Proc. of the 7th Intern. Symp., — Toulouse, France, 16—20 June.—1997 (SP-399, August 1997).
- 

#### GAS JET SIMULATOR OF THE SOLAR UV AND USX RADIATION AND THE EFFECT OF ITS RADIATION ON SOME MATERIALS

E. T. Verkhovtseva, V. I. Yaremenko, and V. D. Telepnev

The paper is concerned with the design and spectral, energetic, and operational features of a unique simulator of the solar vacuum ultraviolet (VUV) and ultra-soft X-ray (USX) radiation covering the wavelength range from 5 to 170 nm. The simulator is destined to investigate the effect of solar VUV and USX radiation on space technology materials as well as on the efficiency of space apparatuses and their systems. The electromagnetic radiation is emitted by a supersonic jet of a gas mixture flowing out into a vacuum chamber, where it is excited by an electron beam. The gas jet is removed by a cryogenic pump and other pumping means. The simulator allows the VUV and USX radiation to be injected through an aperture into a high-vacuum chamber ( $10^{-6}$ — $10^{-7}$  mm Hg) within a large solid angle and to irradiate objects of large area. The irradiance produced by the simulator may be ten times greater than the solar irradiance in an Earth satellite orbit. We give some examples of the effect of the simulated solar VUV and USX radiation on physico-mechanical and tribotechnical characteristics of some space technology materials.

УДК 629.07.54

## Особенности формирования акустического излучения с помощью роторных сирен

В. В. Каракун, А. В. Петрик, М. В. Гнатейко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

*Надійшла до редакції 15.12.97*

Проведено системний аналіз генерації білого шуму за допомогою роторних сирен в наземних випробувальних комплексах КА.

Наиболее опасным с точки зрения возникновения акустической усталости материала конструкции КА является широкополосное акустическое нагружение. Генерируя одновременно множество форм колебаний в механических системах, звуковое давление может стать причиной появления усталостных явлений вследствие возникновения пространственного, либо пространственно-частотного резонансов. Поэтому представляет несомненный интерес вопрос создания широкополосного акустического излучения с помощью однороторной сирены с целью воспроизведения условий, близких к эксплуатационным. Для конкретности ширину полосы частот ограничим числом форм  $n = 100$ .

Задача оптимизации в этом случае сводится к анализу зависимости

$$\frac{\partial A_n}{\partial n} = 0, \quad (1)$$

где  $A_n$  — амплитуда соответствующей гармоники.

Проанализируем, при каких значениях  $m$ ,  $\lambda_k$  и  $\varphi_i$  амплитуда спектральных составляющих генерируемого шума будет постоянной по величине на всей ширине полосы спектра.

Решение поставленной задачи проиллюстрируем на примере функции модуляции в виде прямоугольных импульсов, аналитически представленной выражением [1]

$$f_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^s \left[ \frac{f_0}{m} \sum_{k=1}^p \lambda_k + \frac{2f_0}{\pi} \sum_{k=1}^p \lambda_k \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \times \right. \\ \left. \times [\cos n\varphi_i \cos n\omega t + \sin n\varphi_i \sin n\omega t] \right], \quad (2)$$

откуда легко определяется амплитуда составляющих спектра

$$A_n = 2\pi^{-1} f_0 \sum_{k=1}^p \lambda_k \left[ \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Замена квазитрапецидальной формы функции модуляции прямоугольной, как показали дальнейшие вычисления, не вносит существенных различий в структуру спектра. В то же время достигается значительное упрощение математического аппарата решаемой задачи. С другой стороны, для определения мощности акустического излучения важна не столько форма функции модуляции, сколько значение максимального расхода [2]. С учетом выражений (2), (3) формула (1) приобретает вид

$$\frac{\partial A_n}{\partial n} = \pi^{-1} f_0 \sum_{k=1}^p \lambda_k [B_n^2 + C_n^2]^{-1/2} \left( 2B_n \frac{\partial B_n}{\partial n} + 2C_n \frac{\partial C_n}{\partial n} \right) = \\ = f_0 \sum_{k=1}^p \lambda_k (2\pi)^{-1} \left[ \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right]^{1/2} \times \\ \times \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} i n^{-2} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) \left[ \pi \frac{n}{m} - \operatorname{tg}\left(\pi \frac{n}{m}\right) \right]. \quad (4)$$

Здесь  $m$  — число равных участков, на которые разбивается окружность ротора;  $f(t) = \lambda_k f_0$  ( $0 \leq \lambda_k \leq 1$ ,  $k$  — номер участка) — функция модуляции на тех участках, где нанесены окна;  $f_0$  — высота импульса;  $\varphi_i$  — угол, на который сдвинуты относительно базовой радиальной оси равноудаленные от центра диска статора окна; сумма  $\sum_{k=1}^p$  обозначает, что значения параметра  $k$  берутся не подряд, а только для участков с импульсами;  $p$  — число единичных импульсов в течение периода  $T$ , поэтому  $1 < p \leq m$ .

Из формулы (4) следует, что равенство нулю будет выполняться при условии

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) \left[ \pi \frac{n}{m} - \operatorname{tg}\left(\pi \frac{n}{m}\right) \right] = 0, \quad (5)$$

так как остальные сомножители заведомо положительные. Отсюда следует, что постоянство величины амплитуды спектра акустического излучения, генерируемого однороторной сиреной, не зависит от высоты окон  $f_0 \lambda_k$  и геометрии нанесения окон на диске статора  $\varphi_i$ , а зависит только от числа мест  $m$  на роторе. Другими словами, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) = 0; \quad (6)$$

или

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \pi \frac{n}{m} - \operatorname{tg}\left(\pi \frac{n}{m}\right) \right] = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим вначале уравнение (6), представив функцию  $\sin(2\pi n/m)$  в виде степенного ряда:

$$\begin{aligned} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) &= 2\pi \frac{n}{m} - \frac{\left(2\pi \frac{n}{m}\right)^3}{3!} + \frac{\left(2\pi \frac{n}{m}\right)^5}{5!} - \\ &\quad - \dots + (-1)^{\alpha} \frac{\left(2\pi \frac{n}{m}\right)^{2\alpha+1}}{(2\alpha+1)!}. \end{aligned}$$

Положим  $n = 150$ . Возьмем только первый член разложения в ряд. Тогда

$$\frac{2\pi}{m} \sum_{n=1}^{150} n = 0.$$

Отсюда  $m = \infty$ . Оставив в уравнении только два первых члена разложения:

$$\frac{2\pi}{m} \sum_{n=1}^{150} n - \frac{(2\pi)^3}{m^3 3!} \sum_{n=1}^{150} n^3 = 0,$$

получим  $m = 276$ , а для трех первых членов

$$\frac{2\pi}{m} \sum_{n=1}^{150} n - \frac{(2\pi)^3}{3! m^3} \sum_{n=1}^{150} n^3 + \frac{(2\pi)^5}{5! m^5} \sum_{n=1}^{150} n^5 = 0$$

получим  $m_1 = 275$ .

Уравнение (7), разложенное в степенной ряд, имеет решение  $m = \infty$  при ограничении разложения двумя первыми членами:

$$\frac{1}{3} \pi^3 \frac{1}{m^3} \sum_{n=1}^{150} n^3 = 0.$$

Возьмем три первых члена разложения функции  $\operatorname{tg}(\pi n/m)$ :

$$m^2 \left( 5m^3 \sum_{n=1}^{150} n^3 + 2\pi^2 \sum_{n=1}^{150} n^5 \right) = 0.$$

Это уравнение имеет корни  $m_1 = 0$  и  $m_2 = -39.15$ .

Для четырех первых членов разложения

$$\begin{aligned} 105 \sum_{n=1}^{150} n^3 m^4 + 42\pi^2 \sum_{n=1}^{150} n^5 m^2 + 17\pi^4 \sum_{n=1}^{150} n^7 &= 0; \\ m^2 = -3.10^4 \pm i5.7 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

Согласно формуле Муавра

$$m = 219.3 \pm i125,$$

а модуль этого числа

$$m \approx 275.5 \approx 276.$$

Таким образом, найденное оптимальное значение числа мест  $m$ , как и в предыдущем случае, равно 276. С учетом этого по формуле (3) определяем амплитуды спектра сирены с числом мест на роторе  $m = 276$ .

Результаты численного анализа представлены на рис. 1, причем для простоты предполагается, что  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = 1$ . На диаграмме изображены центрированные значения величин амплитуд, т. е.

$$A_n^0 = \pi A \left[ 2f_0 \sum_{k=1}^p \lambda_k \right]^{-1}.$$

Как видно, при числе мест на диске ротора, равном 276, спектр сирены почти «белый». Для сравнения на рис. 2 изображен спектр сирены с квазитрапецидальной функцией модуляции. Совпадение диаграмм удовлетворительное.

Таким образом, при  $m = 276$  однороторная сирена генерирует акустическое излучение, приближающееся к белому шуму. Уровень акустического давления, пропорционален величине  $f_0$  и, таким образом, может быть увеличен либо уменьшен за счет изменения высоты окна.

Воспользовавшись остаточным циклическим квадратичным цепным кодом, можем изобразить диск ротора сирены при  $m = 276$  (рис. 3). Окна на диске ротора наносятся в интервалах 1, 3, 4, 9, 12, 13, 16, 24, 25, 36, 48, 49, 52, 64, 69, 72, 73, 81, 85, 93, 96, 100, 105, 108, 117, 121, 124, 133, 141, 144,

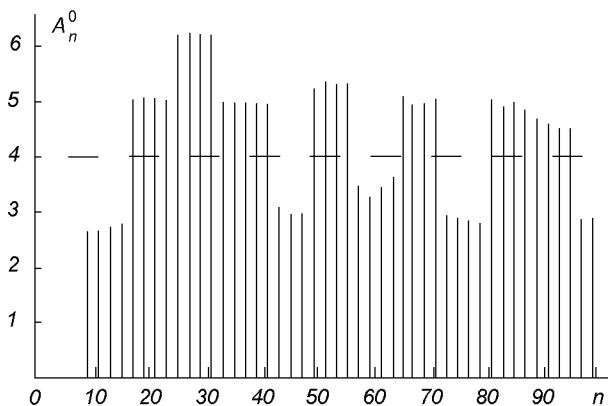


Рис. 1. Спектр однороторной сирены с прямоугольной функцией модуляции и числом мест на диске ротора  $m = 276$

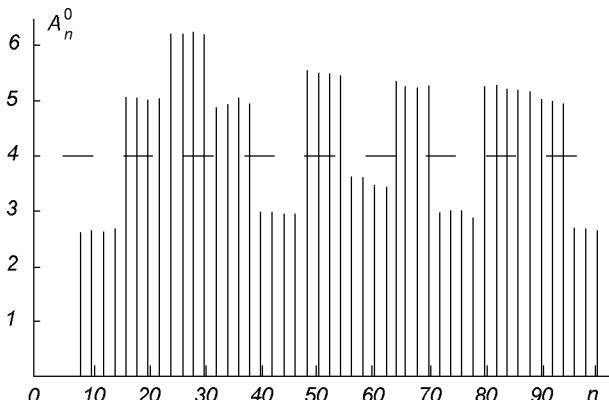


Рис. 2. Спектр однороторной сирены с квазитрапециевидной функцией модуляции и числом мест на диске ротора  $m = 276$

156, 165, 169, 177, 184, 193, 208, 213, 216, 220, 225, 232, 253, 256, 261, 265. Общее число окон равно 46 (некоторые окна находятся рядом, образуя более широкие прорези на диске).

Таким образом, решена задача оптимизации спектра однороторной сирены в достаточно широком диапазоне частот. Показано, что гармонические составляющие спектра таких сирен пропорциональны радиальному размеру окон ротора, а также инвариантны к количеству и взаимному угловому положению окон на диске статора. Постоянство уровня излучения определяется только числом  $m$ .

Реальный спектр сирены для оптимального числа  $m = 276$  будет, вообще говоря, иметь состав, занимающий промежуточное место между двумя функциями модуляции — квазитрапецидальной и треугольной. С другой стороны, если за статором поставить заслонку (шуттер) с заданной геометрической конфигурацией окон, то можно получить желаемый спектр сирены в соответствии с решаемой задачей [3].

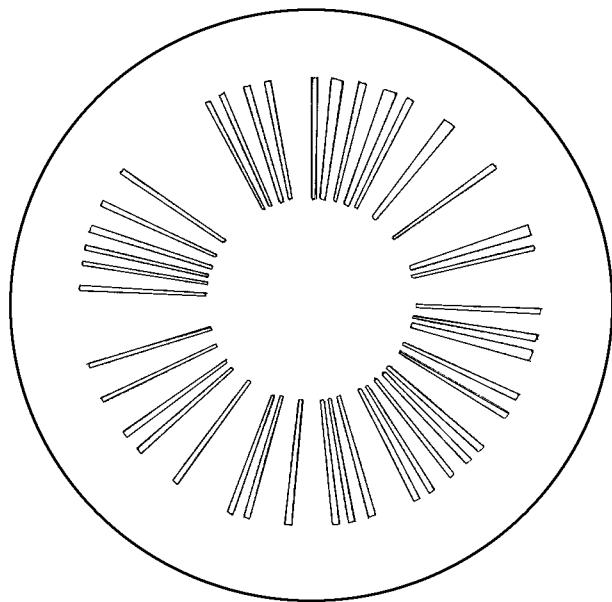


Рис. 3. Диск ротора сирены при числе мест  $m = 276$  и случайном распределении окон по остаточному циклическому квадратичному цепному коду

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности изменения спектра и интенсивности акустического поля сирены путем различного сочетания функций модуляции — трапециевидной, треугольной и иных форм. Кроме того, возможны такие формы, которые могут быть получены сочетанием простейших, например звездочки. Реализовать это можно с помощью заслонки, устанавливаемой за статором и жестко прикрепляемой к корпусу сирены, причем геометрия окон может изменяться по заданному закону по сигналам программируемого устройства.

1. Каракун В. В., Христов Г. П., Ковалев М. С. Некоторые вопросы динамики генераторов акустического давления высокой интенсивности // Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении: Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф. — Иваново, 1989. — С. 127—128.
2. Карновский М. И. Теория и расчет сирен // Журн. техн. физики.—1945.—15, вып. 6.—С. 348—364.
3. Allen C. H. And Watters B. G. Siren Dising for Producing Controlled Wave Forms at High Intensities // J. Amer. Statist. Assoc.—1959.—31, N 2.—P. 177—185.

#### ON SOME PECULIARITIES IN THE GENERATION OF ACOUSTIC NOISE WITH THE HELP OF ROTOR SIRENS

V. V. Karachun, A. V. Petrik, and M. V. Hnatejko

We analyze the generation of white noise with the help of rotor sirens in ground complexes for spacecraft testing.

УДК 533.6.048:629.783

Оценка характера взаимодействия  
свободномолекулярного потока газа со спутником  
по экспериментальным данным

В. А. Шабохин

Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 05.02.98

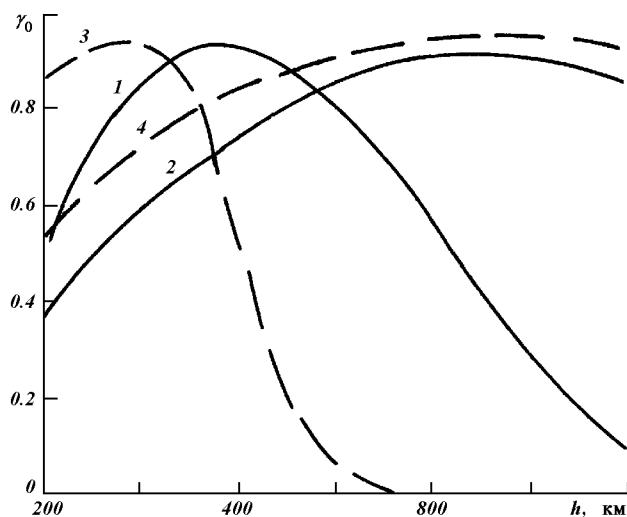
Запропоновано схему взаємодії вільномолекулярного потоку газу з поверхнею космічного апарату та алгоритм визначення аеродинамічних характеристик тіл.

В настоящей статье предложена схема взаимодействия свободномолекулярного потока с поверхностью космического аппарата, которую условно можно назвать «кислородной», произведено сравнение теоретических и опытных данных и получены аналитические выражения для расчета аэродинамических характеристик тел.

В работе [4] приведены результаты экспериментального определения значений коэффициента аэродинамического сопротивления, полученные по торможению для 3132 измерений орбит спутников с высотой перигея 180—300 км и значений эксцентриситета 0—0.11. Обнаружено, что значения коэффициентов аэродинамического сопротивления спутников, близких к сфере, коррелируют с показателем доли атомарного кислорода, взаимодействующего с поверхностью КА.

Анализ различных моделей атмосферы показал, что характер изменения доли компонентов атмосферы с высотой и значением индекса солнечной активности в этих моделях одинаков: с увеличением высоты доля молекулярного азота и кислорода уменьшается, доля гелия увеличивается, а доля атомарного кислорода сначала увеличивается, а затем уменьшается. При этом на высотах 200—800 км в зависимости от индекса солнечной активности  $F_{10.7}$  (экзосферной температуры) атомарный кислород является основным компонентом атмос-

феры. Для примера на рис. 1 приведено изменение доли атомарного кислорода с высотой для моделей атмосферы CIRA-65 (сплошные линии) и CIRA-72 (штриховые линии). Видно, что в рассматриваемом диапазоне высот полета КА преобладающим является атомарный кислород (для исследуемого массива опытных значений  $C_x$  математическое ожидание



индекса солнечной активности  $F_{10.7} = 130.7 \pm 31.9$ .

В ряде работ по исследованию взаимодействия атомарного кислорода с различными поверхностями (кварц, нержавеющая сталь, тефлон, золото, титан) при давлении  $10^{-7}$  тор обнаружено, что он химически адсорбируется почти на каждой известной поверхности (см., например [5]). Поэтому можно предположить, что доля диффузно отраженных молекул пропорциональна доле атомарного кислорода, падающего на поверхность. С другой стороны, из работ [1, 2, 4] следует, что при малых местных углах атаки  $\beta$  имеет место зеркальное отражение молекул, а при  $\beta = 90^\circ$  почти все молекулы отражаются диффузно. Поэтому можно предположить, что доля диффузно отраженных молекул пропорциональна доле атомарного кислорода и синусу угла атаки  $\beta$ . Запишем это предположение в виде:

$$\sigma = \gamma_0 \sin\beta, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  — доля атомарного кислорода.

Учитывая вариации состава атмосферы вдоль орбиты, а также наличие гетерогенных процессов с формированием хемосорбированного слоя кислорода на поверхности, в первом приближении целесообразно использовать значение  $\gamma_0$ , определенное за виток. Тем самым будет косвенно учитываться процесс образования адсорбционного слоя.

Вторым важным параметром взаимодействия свободномолекулярного потока с поверхностью является коэффициент аккомодации энергии  $\alpha_{\text{ак}}$  для адсорбированных молекул. Экспериментальных данных по определению коэффициента аккомодации для атомарного (молекулярного) кислорода нет. Поэтому произведем качественную оценку значений  $\alpha_{\text{ак}}$  на основе экспериментальных данных.

В процессе взаимодействия атомарного кислорода с поверхностью происходит образование адсорбционного слоя. Как показано в работе [5], заполнение адсорбционного слоя пропорционально числу атомов, падающих в единицу времени на единицу поверхности. Чем больше атомов кислорода падает на поверхность, тем больше вероятность заполнения адсорбционного слоя атомами кислорода как при физической, так и при химической адсорбции. После образования первого слоя происходит образование второго и третьего слоев. Первые два слоя могут адсорбироваться в виде атомов, но десорбироваться в виде молекул. Так как поверхность покрыта адсорбционным слоем, имеет неровности, то газовая частица может отражаться не после единственного столкновения, а после некоторой задержки на поверхности. Поэтому можно предположить, что коэффициент  $\alpha_{\text{ак}}$  в первом приближении про-

порционален доле атомарного кислорода

$$\alpha_{\text{ак}} = \gamma_0. \quad (2)$$

Для определения коэффициентов нормальной  $P_n$  и касательной  $P_t$  сил, действующих на площадку, воспользуемся соотношениями [3]:

$$\begin{aligned} P_n &= 2(2 - \sigma)\sin^2\beta + \sigma\sqrt{\pi/2}\sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}}\sin\beta, \\ P_t &= 2\sigma\sin\beta\cos\beta, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\sigma$  — доля диффузно отраженных молекул;  $\beta$  — угол между вектором скорости набегающего потока и поверхностью элементарной площадки.

При этом принимались общепринятые допущения, что скорость спутника значительно больше тепловой скорости потока.

Интегрируя выражения (3) согласно [3], получим формулу для определения  $C_x$  сферы для диффузной схемы взаимодействия при  $\sigma = 1$ :

$$C_x = 2 + \sqrt{2\pi/9}\sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}}. \quad (4)$$

График зависимости  $C_x$  для сферы, полученный с использованием (4) для различных значений  $\alpha_{\text{ак}}$ , представлен на рис. 2 (кривая 1). Здесь же приведены экспериментальные значения  $C_x$  для сферы (треугольники), полученные для  $h_{\min} = 180$ —210 км и различных значений средненеинтегральной за виток доли атомарного кислорода  $\gamma_0$ . Расчет  $\gamma_0$  проводился по данным модели атмосферы CIRA-65 на основании математических ожиданий значений

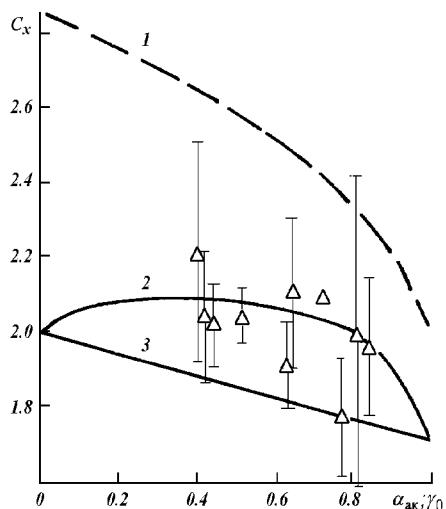


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $C_x$  сферы от коэффициента аккомодации (доли атомарного кислорода): треугольники — экспериментальные величины генеральных средних значений  $C_x$  с доверительной вероятностью 0.95; кривая 1 — расчет по диффузной схеме; 2 — согласно (6); 3 — согласно (7)

гео- и гелиофизических факторов общей выборки. Опытные значения  $C_x$  лежат значительно ниже кривой 1.

Выражения (3) с учетом (1) имеют вид

$$\begin{aligned} P_n &= 4\sin^2\beta - 2\gamma_0\sin^3\beta + \gamma_0\sqrt{\pi/2}\sqrt{1-\alpha_{ak}}\sin^2\beta, \\ P_\tau &= 2\gamma_0\sin^2\beta\cos\beta. \end{aligned} \quad (5)$$

Интегрируя (5), получим для сферы

$$C_x = 2 - 0.27\gamma_0 + \gamma_0\sqrt{\pi/8}\sqrt{1-\alpha_{ak}}. \quad (6)$$

Эта зависимость с учетом (2) представлена на рис. 2 (кривая 2).

Предельный случай можно получить, полагая в формуле (6)  $\alpha_{ak} = 1$ .

В этом случае

$$C_x = 2 - 0.27\gamma_0. \quad (7)$$

График изменения  $C_x = f(\gamma_0)$  согласно (7) приведен на рис. 2 (кривая 3).

На рис. 3 показаны зависимости опытных и расчетных значений коэффициента  $C_x$  для сферы от высоты апогея. Как видно из графика, большинство экспериментальных данных лежит между кривыми (3) и (4).

Расчет  $C_x$  согласно (6) удовлетворительно согла-  
суется с большей частью опытных данных  $C_x$ .

Таким образом, предложенная «кислородная»  
схема взаимодействия, основанная на преоблада-  
нии химически активного атомарного кислорода на  
рассмотренных высотах полета спутников и ха-  
рактере его взаимодействия с поверхностью КА, удов-  
летворительно описывает имеющиеся эксперимен-  
тальные данные.

Необходимо отметить также, что, по-видимому,  
значения коэффициентов нормальной  $P_n$  и каса-

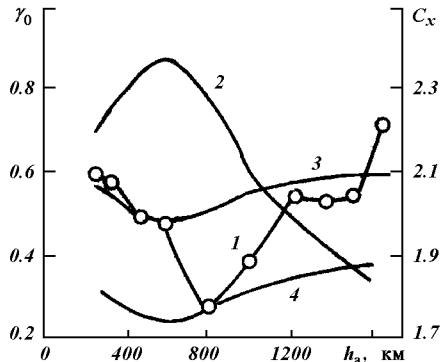


Рис. 3. Значения коэффициента  $C_x$  для сферы: 1 — экспериментальные данные при  $h_n = 180—210$  км; 2 — расчетные значения доли атомарного кислорода для  $h_n = 200$  км; 3 — расчет  $C_x$  согласно (6); 4 — расчет  $C_x$  согласно (7)

тельной  $P_\tau$  сил, действующих на площадку, при движении КА вдоль орбиты изменяются вследствие изменения состава набегающего потока, особенно для орбит с большим эксцентриситетом. Это должно приводить и к изменению аэродинамических сил, действующих на КА при движении по витку. В то же время для круговых орбит характер взаимодействия потока с поверхностью для высот с преобладанием атомарного кислорода будет отличаться от изложенного для эллиптических орбит. Но и для круговых орбит можно воспользоваться предложенными соотношениями, поскольку экспериментальные данные  $C_x$  для малых эксцентриситетов орбит хорошо согласуются с рассчитанными по формуле (6).

Ниже приведены выражения для определения аэродинамических характеристик тел простой формы для принятой «кислородной» схемы взаимодействия.

**Плоская пластина.** Используя формулы (5) для  $P_n$  и  $P_\tau$  (см. рис. 4, 5), после интегрирования получим

$$\begin{aligned} C_x &= 4\sin^3\beta - 2\gamma_0\sin^4\beta + \\ &+ \gamma_0\sin^3\beta\sqrt{(\pi/2)(1-\alpha_{ak})} + 2\gamma_0\sin^2\beta\cos^2\beta, \\ C_y &= 4\sin^2\beta\cos\beta - 4\gamma_0\sin^3\beta\cos\beta + \\ &+ \gamma_0\sin^3\beta\cos\beta\sqrt{(\pi/2)(1-\alpha_{ak})}, \end{aligned} \quad (8)$$

При  $\alpha_{ak} = 1$  выражения (8) имеют вид

$$\begin{aligned} C_x &= 4\sin^3\beta + 2\gamma_0\sin^2\beta\cos^2\beta, \\ C_y &= 4\sin^2\beta\cos\beta(1 - \gamma_0\sin\beta). \end{aligned}$$

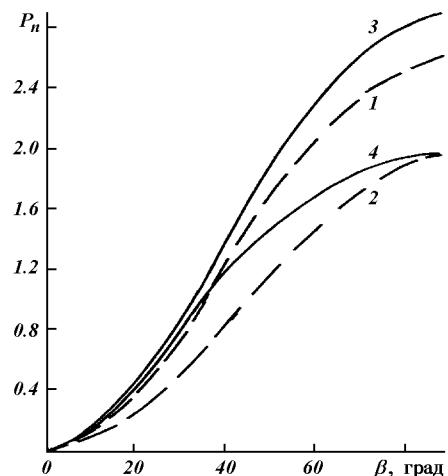


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $P_n$  пластины от угла атаки: согласно диффузной схеме при  $\sigma = 1$  (кривая 1 — для  $\alpha_{ak} = 0.8$ , 2 —  $\alpha_{ak} = 1$ ) и согласно «кислородной» схемы (3 —  $\alpha_{ak} = \gamma_0 = 0.8$ , 4 —  $\alpha_{ak} = \gamma_0 = 1$ )

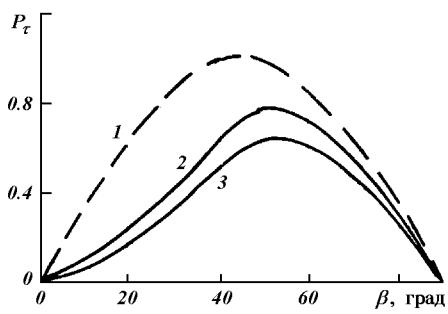


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $P_t$  от угла атаки: 1 — диффузная схема при  $\sigma_t = 1$ ,  $\alpha_{\text{ак}} = 1$ ; 2, 3 — «кислородная» схема при  $\gamma_0 = 1$  и 0.8 соответственно

### Круговой цилиндр.

$$C_n = 2.67 \sin^3 \beta + \sqrt{2\pi/9} \gamma_0 \sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}} \sin^2 \beta - \\ - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta;$$

$$C_r = \frac{\pi}{2} \gamma_0 \sin^2 \beta \cos \beta;$$

$$C_x = 2.67 \sin^3 \beta + \sqrt{2\pi/9} \sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}} \sin^3 \beta + \\ + \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta);$$

$$C_y = 2.67 \sin^2 \beta \cos \beta + \gamma_0 \sqrt{2\pi/9} \sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}} \sin^2 \beta \cos \beta - \\ - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta \cos \beta.$$

При  $\alpha_{\text{ак}} = 1$

$$C_n = 2.67 \sin^2 \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta;$$

$$C_r = \frac{\pi}{2} \gamma_0 \sin^2 \beta \cos \beta;$$

$$C_x = 2.67 \sin^3 \beta + \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta);$$

$$C_y = 2.67 \sin^2 \beta \cos \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta \cos \beta.$$

Сравнение показывает, что значение  $C_x$ , вычисленное в рамках «кислородной» модели, меньше вычисленных по диффузной схеме, причем с увеличением  $\gamma_0$  и угла атаки  $\beta$  эта разность уменьшается.

Значение  $C_x$  цилиндра для случая поперечного

обтекания ( $\beta = 90^\circ$ ) равно

$$C_x = 2.67 + \sqrt{2\pi/9} \gamma_0 \sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}} - \frac{\pi}{4} \gamma_0.$$

**Конус.** Выражение для расчета аэродинамического сопротивления с углом полурасвора  $\alpha$  на угле атаки  $\beta = 0$  имеет вид

$$C_x = 2 \sin^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha (2\pi + \gamma_0 \sqrt{\pi^3/8} \sqrt{1 - \alpha_{\text{ак}}}) + \\ + 2\pi \gamma_0 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta).$$

Расчеты  $C_x$  конуса, проведенные по «кислородной» и диффузной схеме при одинаковых значениях  $\gamma_0$  и  $\alpha_{\text{ак}}$ , близки друг к другу.

Не вызывает сомнения, что реальные процессы, происходящие на поверхности в разреженном газе, гораздо сложнее.

Вместе с тем предложенная теоретическая модель косвенно учитывает структуру набегающего потока и удовлетворительно описывает характер изменения имеющихся опытных данных, согласуется с экспериментальными данными других авторов и может быть полезна для дальнейших исследований.

1. Баранцев Р. Г. Новые результаты аналитической теории взаимодействия газов с поверхностями // Динамика разреженного газа: Тр. VI Всесоюз. конф. — Новосибирск, 1980.—Кн. 1.—С. 104—114.
2. Варакин Г. К., Фарафонов В. Г. Аэродинамические характеристики элемента поверхности, обтекаемой высокоскоростным свободномолекулярным потоком // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.—1975.—№ 4.—С. 181—184.
3. Ковтуненко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. — Киев.: Наук. думка, 1977.—156 с.
4. Шабохин В. А. Экспериментальные результаты определения аэродинамических характеристик спутников в свободномолекулярном потоке газа // Косміч. наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 68—70.
5. Riley J., Giesse C. F. Interaction of atomic oxygen with various surfaces // J. Chem. Phys.—1970.—53.—P. 146.

### ASSESSING THE INTERACTION BETWEEN FREE-MOLECULE GAS FLOW AND A SATELLITE FROM EXPERIMENTAL DATA

V. A. Shabokhin

A model is proposed for the interaction between free-molecule gas flow and the surface of a spacecraft. The model can be used for determining aerodynamic body characteristics.

УДК 532.593:541.24

# Моделирование средств обеспечения работоспособности сплошности топлива КА

**А. С. Макарова, С. А. Давыдов, Л. А. Сорокина, А. В. Давыдова**

Дніпропетровський державний університет

*Надійшла до редакції 14.05.97*

Запропоновані методики розрахунку утримувальної здатності засобів забезпечення суцільноті палива КА в умовах динамічного навантаження імпульсного та вібраційного типу, а також на переходних етапах роботи рушійної установки.

Создание новых высокоманевренных типов КА многоцелевого назначения требует постоянного совершенствования системы топливоподачи. Главным требованием, предъявляемым к этой системе, является обеспечение надежного запуска двигательной установки из состояния практической невесомости. Использование специальных средств обеспечения сплошности (СОС) топлива в виде разнообразных сетчатых элементов внутри полостей топливных баков позволяет осуществлять многократные запуски двигательной установки в нужные моменты времени полета КА. Однако необходима всесторонняя надежная проверка работоспособности СОС в разных условиях полета.

В настоящее время, как правило, подвергается проверке работоспособность СОС топлива в условиях статического нагружения. Однако при выполнении маневров летательный аппарат подвергается динамическим воздействиям вибрационного и импульсного характера. Кроме того, в последние годы существенно увеличилось относительное время работы СОС на переходных этапах работы двигательной установки. Экспериментальная проверка работоспособности СОС топлива в указанных случаях на полномасштабных моделях в условиях нормальной гравитации связана со значительными материальными затратами, а иногда практически нереализуема. Поэтому разработка математических моделей процесса разделения фаз посредством сетчатых

экранов и создание на основе этих моделей методик численного расчета уровня работоспособности сетчатых разделителей позволяет эффективно прогнозировать их работу в самых разных ситуациях при минимальных материальных затратах.

Существующие в настоящее время модели взаимодействия газожидкостного потока с сетчатыми преградами основаны на существенных упрощающих предположениях и не вполне адекватны реальным физическим процессам. Например, в работе [1] при расчете прорыва газа через перфорированный барьер используется теоретическая модель, в которой не учитывается вязкость контактирующих фаз, а также коэффициент живого сечения перфорированного барьера. Применимость предлагаемой методики расчета работоспособности капиллярных фазоразделителей для инженерной практики ограничена сетчатыми экранами с коэффициентом живого сечения, близким к единице.

В работе [2] для расчета работоспособности сетчатых разделителей предлагается обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, основанное на представлении сетчатого экрана в виде системы равномерно распределенных торов. При этом подходе, как и в [1], существенно упрощается внутренняя геометрия канала ячеек сетчатого барьера. Коэффициент живого сечения учитывается косвенным путем, а диссипативные силы учитываются лишь для течения газовой фазы по каналам

ячеек сетки.

Предлагаемая модель работоспособности СОС сетчатого типа и методики расчета удерживающей способности в динамических условиях лишены отмеченных недостатков. В расчетные уравнения непосредственно входит коэффициент живого сечения сетчатого экрана. При моделировании учитывается вязкость как жидкой, так и газовой фазы. Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая процесс взаимодействия поверхности раздела фаз с сетчатой преградой, получена на основе законов сохранения импульса, энергии и массы. При этом методика численного расчета отличается простотой реализации и малыми затратами машинного времени. При моделировании учитываются физические свойства обеих контактирующих фаз, а также интенсивность действия массовых сил. Внешние силовые воздействия, приложенные к сетчатому разделителю, описываются в математической модели специальными параметрами.

Достоверность методики расчета экспериментально подтверждается для сетчатых разделителей фаз с размерами ячеек от 10 до 100 мкм любого типа плетения.

Одним из возможных условий функционирования СОС во время полета летательного аппарата является перемещение топлива с газовыми включениями вдоль поверхности сетчатых экранов в результате динамических воздействий на корпус КА, а также на этапе запуска двигательной установки. Математическая модель и методика численного расчета СОС сетчатого типа в указанных условиях

позволяет оценить степень снижения их работоспособности. Коэффициент снижения удерживающей способности СОС сетчатого типа в данном случае зависит от чисел Рейнольдса и Вебера и может быть легко получен по соответствующим критериальным зависимостям. Достоверность методики экспериментально подтверждена для чисел Рейнольдса в диапазоне от 0.5 до 90 и чисел Вебера от 1.5 до 600.

Таким образом, методики расчета удерживающей способности СОС топлива сетчатого типа позволяют эффективно оценивать пригодность того или иного типа сетчатого элемента для выполнения конкретного полетного задания. Приемлемость расчетных методик подтверждена экспериментально для широкого класса сетчатых экранов.

1. Gluck D. F. Propellant position control by capillary barriers during spacecraft rotational maneuvers // AIAA paper.—1969.—N 529.—8 p.
2. Tegart J. R. Influens of pressure transients on the performance of capillary propellant acquisition system // AIAA paper.—1976.—N 597.—8 p.

#### SIMULATING THE EFFICIENCY OF THE MEANS ENSURING FUEL CONTINUITY IN SPACE VEHICLES

A. S. Makarova, S. A. Davydov, L. A. Sorokina, A. V. Davydova

We propose calculation procedures for determining the holding capacity of the means that ensure fuel continuity in space vehicles under the dynamic impulsive or vibrational load as well as at transition stages of power-plant operation.

УДК 629.782(73)

**Авиационно-космическая  
Обзор по материалам открытой  
печати за 1988—1996 гг.**

система

«Пегас».

зарубежной

**II. Характеристики и конструктивные особенности**

**В. П. Гусынин**

Національне космічне агентство України, Київ

*Надійшла до редакції 27.02.98*

Розглядаються основні характеристики та конструктивні особливості одної експлуатованої на даний момент авіаційно-космічної системи «Пегас». Приводяться дані про компоновочну схему, систему наведення та керування, технологію та використані матеріали, енергетичні характеристики, типову програму польоту та особливості наземного обслуговування авіаційно-космічної системи.

В настоящее время ракета-носитель (РН) воздушного базирования «Пегас» (США) рассматривается как РН сверхлегкого класса. Она открыла широкие возможности экономичной доставки в космос военных, коммерческих и научных спутников.

РН «Пегас» представляет собой принципиально новую транспортную космическую систему. Запуск ракеты с самолета-носителя (СН) дает ряд преимуществ по сравнению с ракетами, стартующими с поверхности Земли: начальная скорость самолета и высота запуска позволяют уменьшить при выведении ракеты аэродинамические и гравитационные потери; в условиях разреженности атмосферы повышается эффективность работы двигателей; за счет энергетики самолета сокращаются затраты на формирование орбиты с заданным наклонением. В целом энергетические затраты на выведение грузов в космос снижаются на 10—15 %, а масса полезной нагрузки (ПН) возрастает примерно вдвое. Кроме того, запуск ракеты с самолета не требует создания дорогостоящего наземного стартового комплекса, значительно снижает требования по безопасности полигона, позволяет оперативно подготовить и осу-

ществить запуск. Помимо высоких экономических показателей, РН «Пегас» обладает рядом важных эксплуатационных качеств, в частности непродолжительным временем подготовки к запуску, высокой мобильностью применения.

В основу проектирования РН «Пегас» было положено требование максимально возможной простоты конструкции, малой массы и низкой стоимости. Аэродинамическая конструкция РН была отработана на других летательных аппаратах, поэтому программа разработки не предусматривала продувок в аэродинамических трубах и испытаний масштабных моделей. Для выигрыша времени и экономии средств отказались и от испытаний твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ) ракеты в имитированных высотных условиях.

#### **КОНСТРУКЦИЯ**

Базовая РН «Пегас» — трехступенчатая твердотопливная одноразовая РН. В ее состав входят три реактивных твердотопливных двигателя, фиксиро-

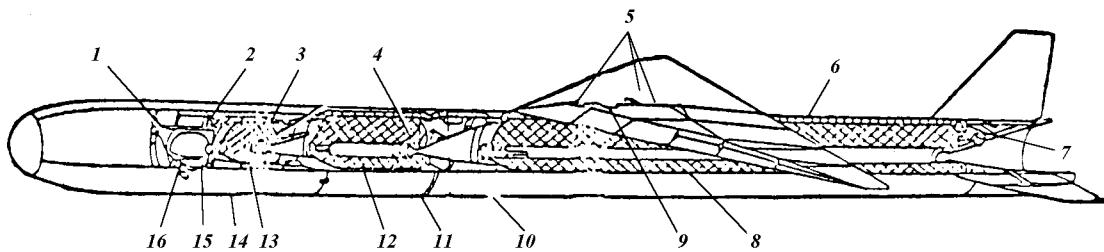


Рис. 1. Компоновочная схема ракеты-носителя «Пегас»: 1 — плоскость разделения отсека оборудования и полезной нагрузки; 2 — отсек оборудования; 3 — плоскости разделения второй и третьей ступеней; 4 — гибкий подшипник, обеспечивающий качание сопла РДТТ второй и третьей ступеней; 5 — опоры крепления к подкрыльевому пилону РН; 6 — гаргрот; 7 — приводы консолей хвостового стабилизатора; 8 — РДТТ первой ступени; 9 — замок крепления к подкрыльевому пилону СН; 10 — плоскость разделения первой и второй ступеней; 11 — плоскость разделения переходника между первой и второй ступенями; 12 — РДТТ второй ступени; 13 — РДТТ третьей ступени; 14 — головной обтекатель; 15 — баллон со сжатым азотом для микродвигателей; 16 — микродвигатели

ванное дельтовидное крыло, хвостовое оперение, обтекатель полезного груза, система управления на третьей ступени (рис. 1). Общий вид РН «Пегас» показан на рис. 2.

Стартовая масса РН составляет около 18.5 т, длина — 15 м, диаметр первых двух ступеней — 1.27 м, третьей ступени — 0.97. При старте третья ступень с полезной нагрузкой полностью закрыта головным обтекателем диаметром 1.27 м, что делает диаметр ракеты постоянным по длине.

РДТТ, разработанные фирмой «Hercules Aerospace» для трех ступеней ракеты «Пегас», используют последние достижения в области топлив, корпусов, сопел, бронировки и технологий производства. Они изготавливаются намоткой угольного волокна IM-7 с использованием связующего HBRF-55A как РДТТ для межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) «Минитмен» и стартовых ускорителей ракеты-носителя «Дельта-2». Изоляция из мономера этиленпропилендиена, армиро-

ванного волокном Armid, и связующее SEL-133 для материала корпуса такие же, как на упомянутых стартовых ускорителях ракеты «Дельта-2». Топливо класса 1.3 как и топливо ракет «Першинг-2» использует горючее-связку на основе полибутадиена с концевой группой и 88 % твердой фазы. Топливный заряд характеризуется эластичностью, а также низкой скоростью горения, что важно для ракеты, запускаемой с самолета. Топливо класса 1.3 согласно инструкции требует удаления хранилищ и мест сборки от жилых зданий не менее чем на 70 м. Если бы было выбрано топливо класса 1.1, то эта величина возросла бы до 400 м, что весьма усложнило бы эксплуатацию.

РДТТ на всех ступенях ракеты «Пегас» имеют сопла из фенолуглеродного материала, армированного угольным волокном, связанным эпоксидной смолой. В критических сечениях сопел имеется монолитный вкладыш из материала «углерод—углерод» с трехмерной ориентацией волокон, отличающегося высокой прочностью и низкой эрозией. РДТТ второй и третьей ступеней имеют качающиеся сопла в эластичных опорных шарнирах «Флекс-сил» из кремнийорганического каучука, армированного стекловолокном. Для отклонения сопел относительно двух осей служат электромеханические приводы. Сопло РДТТ первой ступени фиксированное, поскольку на участке работы этого РДТТ управление РН обеспечивают отклоняемые консоли стабилизатора.

Характеристики РДТТ ступеней ракеты «Пегас» приведены в табл. 1.

На первой ступени РН установлены аэродинамические плоскости — дельтовидное крыло и трехконсольный хвостовой стабилизатор. Ступень решили снабдить крылом после нескольких серий

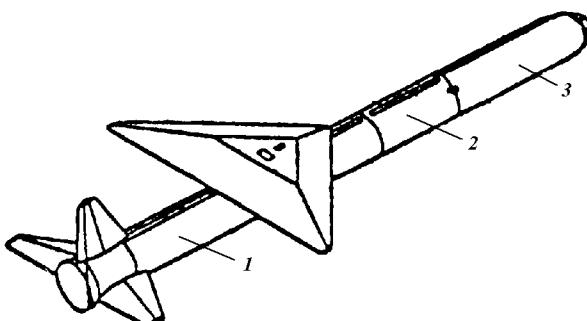


Рис. 2. Общий вид ракеты-носителя «Пегас»: 1 — первая ступень; 2 — вторая ступень; 3 — третья ступень и головной обтекатель

Таблица 1. Характеристики РДТТ ракеты «Пегас»

Характеристика	Первая ступень	Вторая ступень	Третья ступень
Длина, м	9.4	2.32	3.79
Сухая масса, т	1.26	0.36	0.31
Масса топлива, т	12.15	3.03	0.78
Время горения, с	72.3	71.4	64.6
Максимальная тяга в вакууме, т	59.53	14.02	4.11
Средняя тяга в вакууме, т	50.8	12.6	4.1
Максимальное давление в камере сгорания, кг/см <sup>2</sup>	76.5	70.5	52.7
Удельный импульс в вакууме, с	295.3	295.5	291.1
Тип конструкции	монокок	монокок	монокок
Материал обшивки	эпоксид графита	эпоксид графита	эпоксид графита
Топливо	гидроксильный полибутадиен	гидроксильный полибутадиен	гидроксильный полибутадиен
Обозначение РДТТ	Orion-50S	Orion-50	Orion-38
Количество двигателей	1	1	1
Коэффициент расширения	40:1	65:1	60:1

моделирования бескрыльных ракет. Наличие крыла позволяет ограничить угол атаки значением  $20^\circ$ , а без него пришлось бы выдерживать угол атаки до  $60^\circ$ , что затрудняет управление полетом и увеличивает нагрузки на конструкцию. При наличии крыла аэродинамическое качество повышается до 4, и на начальном участке полета энергетические характеристики ракеты улучшаются по сравнению с вариантом, когда используется только тяга двигателя (без подъемной силы).

Дельтовидное крыло имеет затупленную переднюю кромку и срезанные законцовки. Форма крыла уменьшает смещение центра давления с увеличением числа  $M$ . Затупленные передние кромки (радиус закругления 2.5 см) уменьшают теплопередачу к конструкции. Срезанные законцовки крыла позволяют до некоторой степени контролировать завихрение, что способствует увеличению подъемной силы. Кроме того, благодаря срезанным законцовкам размах крыла не превышает 6.7 м, что важно для подвески ракеты к самолету B-52 (рис. 3).

Толщина крыла составляет 0.2 м, масса — менее 272 кг. Крыло рассчитано на воздействие аэродинамической нагрузки 45.4 т на участке максимального скоростного напора, который начинается при скорости, соответствующей числу  $M = 1.8—2.0$ , примерно через 10—15 с после отделения ракеты от СН.

На двух участках размером  $0.6 \times 0.6$  м на нижней поверхности крыла наносится пробковая теплоизоляция. Толщина этого слоя около 2 мм. По расчетам такая теплоизоляция требуется в течение последних 10—15 с перед отделением первой ступени, и примерно 20 % пробки обугливается. Особо высокий нагрев участков, защищаемых пробкой, объясняется тем, что на них садится скачок уплотнения, возникающий в месте соединения крыла с корпусом первой ступени.

Для монтажа на первой ступени ракеты крыла и узлов крепления к подкрыльевому пилону самолета-носителя служит алюминиевое «седло», изготовленное из листового алюминия толщиной 10—12 мм.

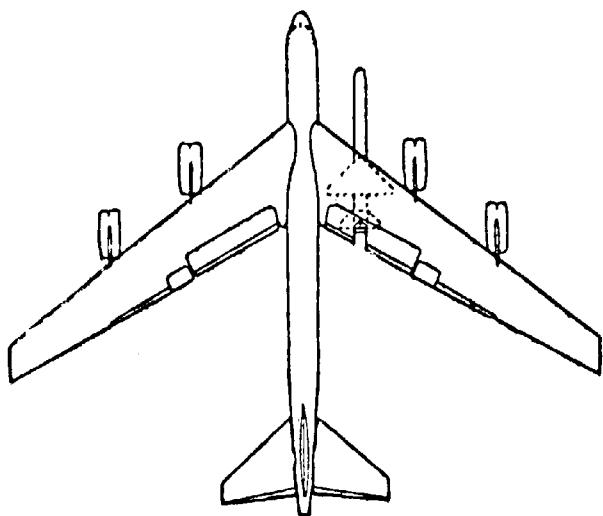


Рис. 3. Схематическое изображение самолета B-52 с РН «Пегас» на подкрыльевом пилоне

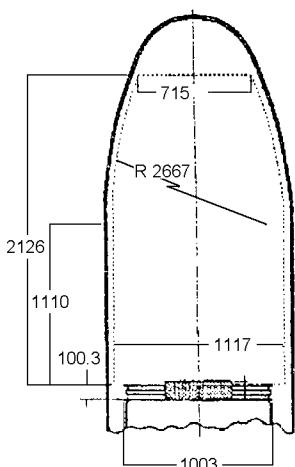


Рис. 4. Обтекатель ракеты-носителя «Пегас»

ляемое как единое целое с корпусом РДТТ первой ступени во время намотки. К корпусу оно крепится лентами из графитового волокна, которые отверждаются вместе с материалом корпуса. «Седло» несет четыре узла крепления, пylon — три узла.

Хвостовой стабилизатор и крыло изготавливаются из композиционного материала на основе угольного (графитового) волокна фирмой Burt Rutan's Scaled Composites. Отклоняемые вертикальная и горизонтальные консоли стабилизатора снабжены приводами.

Головной обтекатель (рис. 4), закрывающий полезную нагрузку, может отделяться на различных этапах полета, в том числе на пассивном участке при нулевой перегрузке и в конце работы второй ступени, когда перегрузка достигает 8g.

Параметры обтекателя: длина — 4.42 м, диаметр — 1.27 м, масса — 110 кг, секции — 2, материал — алюминиевые соты (графитовый эпоксид), размер отсека для полезной нагрузки —  $1.8 \times 1.2$  м. На обтекателе имеются отверстия для двух комплектов обтекаемых подвесных контейнеров, смотровой люк полезного груза, пиromеханические ножи для отделения обтекаемого кольца передней части обтекателя. Сотовый выпуск газа проходит сквозь малые отверстия через внутренние облицовочные листы. Выпуск основной газовой массы происходит через два выреза у основания обтекателя. Находясь на земле, зона полезной нагрузки охлаждается и удерживается при положительной герметизации тележкой кондиционера. Во время полета до старта ракеты сухой аммиак продувается через обтекатель из баков внутри СН.

Для оценки нагрузок, действующих на конструк-

цию РН, крылья, корпуса РДТТ и другие элементы, был проведен прочностной анализ. При прочностных испытаниях усилия в 1.25 раза превышали максимальные рабочие нагрузки. Было установлено, что расчетные и экспериментальные значения деформации корпусов совпадают в пределах 2—10 %. По результатам летных испытаний РН «Пегас» и в соответствии с расчетными данными максимальные нагрузки действуют на РН при работе РДТТ первой ступени. Вертикальное ускорение равно 2.8 g, причем корпус РДТТ воспринимает 35 %, а крыло — 55 % полной силы.

Отличительной особенностью конструкции РН «Пегас» является применение в ее составе композиционных материалов. В общей сложности 94 % массы конструкции ракеты составляют композиционные материалы, 5 % — алюминий и 1 % — титан.

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления РН «Пегас» размещается на третьей ступени в специальном тороидальном конструктиве. При ее разработке использовались самые современные достижения в области микро-ЭВМ и лазерных навигационных средств. В состав системы управления входят 14 микропроцессоров, инерциальный измерительный блок на основе кольцевых лазерных гироскопов, телеметрический передатчик, две аккумуляторные батареи системы наведения, микродвигатели ориентации, два приемника и две аккумуляторные батареи системы самоликвидации, а также устройство, управляющее пиротехническими средствами третьей ступени. Система бортовой телеметрии имеет минимальный состав оборудования; оснащение ее специальной кабельной сетью, как это обычно делается, не предусмотрено. Небольшой телеметрический контейнер имеет неразъемное соединение с системой полетного контроля, устанавливаемой на заключительной стадии подготовки к пуску. Бортовая телеметрическая система выполняет и роль системы предстартовой проверки.

Резервирование бортовых систем, кроме системы самоликвидации, не предусмотрено. Бортовой компьютер, работающий в виртуальном режиме, обеспечивает общее управление ракетой в полете, им выдаются команды на включение маршевых двигателей, отклонение стабилизаторов, изменение вектора тяги. На БЦВМ РН «Пегас» также возлагаются задачи диспетчера начальных процессов работы ПН, задания циклограммы включения, развертывания электропитаний спутника. Масса компьютера,

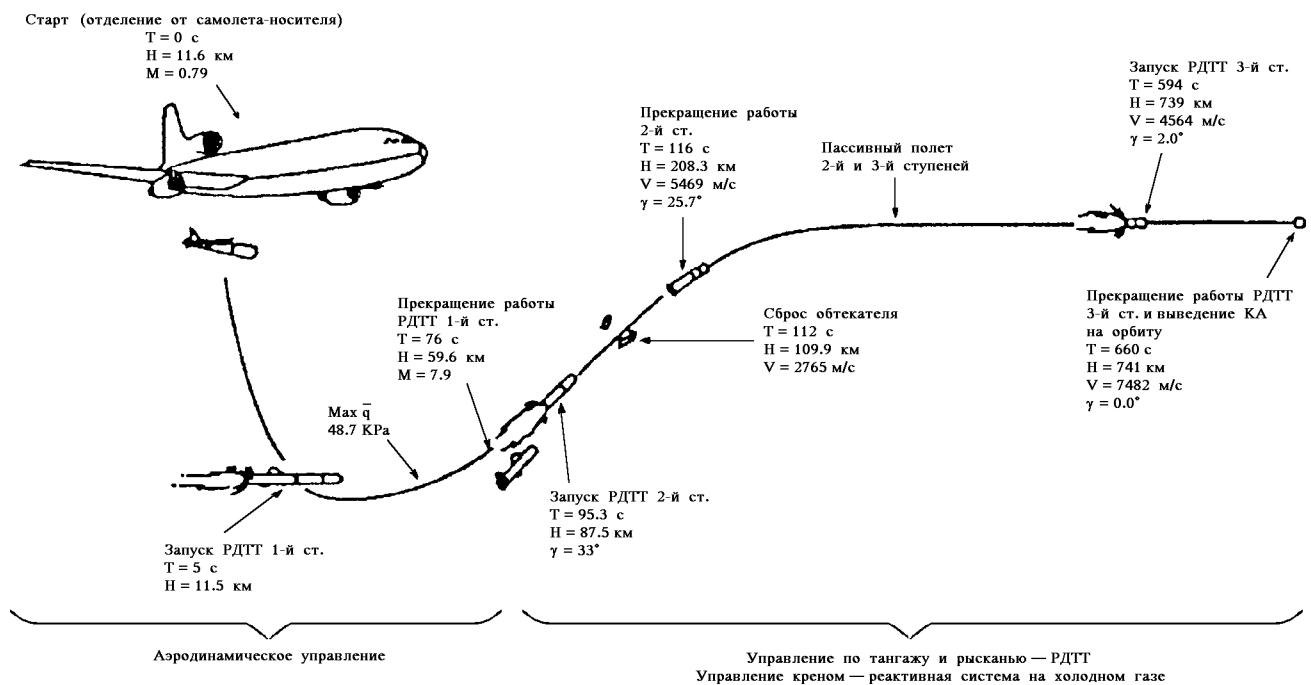


Рис. 5. Схема полета ракеты-носителя «Пегас»

разработанного фирмой Aitech (Израиль), менее 8 кг.

Управление полетом ракеты на начальном участке траектории обеспечивают отклоняемые консоли стабилизатора, смонтированные на юбке первой ступени, которая окружает сопло РДТТ этой ступени. Под верхней частью юбки находятся приводы консолей. На участках работы РДТТ второй и третьей ступеней управление по тангажу и рысканию обеспечивают качающиеся сопла этих РДТТ, а по крену — микродвигатели, работающие на сжатом азоте. Они же обеспечивают управление по трем осям на кратковременных пассивных участках полета. В задачу этих микродвигателей входит также ориентация и закрутка третьей ступени перед отделением от нее полезной нагрузки. Подвешенная к самолету-носителю ракета «Пегас» получает питание (28В постоянного тока) по кабелю от энергетической установки самолета. Тот же кабель связывает систему наведения ракеты с бортовой ЭВМ самолета. На самолете имеется также контрольный инерциальный измерительный блок, который позволяет уточнить выставку гироплатформы бортового инерциального измерительного блока ракеты. Пилот самолета со своего пульта вводит необходимую информацию в систему наведения ракеты и поворотом ручки дает команду на

отделение ракеты от самолета. Если по каким-либо причинам отделение ракеты в заданной точке не произошло, пилот вводит в нее новые полетные данные, и отделение производится в одной из альтернативных точек. Это обеспечивает гибкость эксплуатации ракеты.

#### ОСОБЕННОСТИ НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Отдельные узлы и элементы конструкции РН «Пегас», изготовленные на предприятиях фирм-поставщиков, доставляются в летно-испытательный центр BBC на авиабазу Эдвардс (штат Калифорния). Здесь в специальном помещении размером 18 × 24 м производится окончательная сборка ракеты. Сборка ракеты производится в горизонтальном положении на автоприцепе, который доставляет ее к самолету. Команде из 6—12 человек на сборку ракеты требуется около двух недель. Отдельные ступени ракеты доставляются в здание сборки на тележках, так что при сборке не нужны подъемные краны, а достаточно домкратов и лебедок. Электронное оборудование, микродвигатели и некоторые другие блоки и системы поставляются в ампулированном виде, так что для сборки не требуется «чистое» помещение. Однако установка

на ракете полезной нагрузки осуществляется в условиях чистого помещения, для чего часть прицепа затягивается тентом. Затем устанавливается головной обтекатель. Для подачи двигателей всех трех ступеней на сборку используются специальные рельсовые направляющие, что исключает потребность в мощных подъемных устройствах. В настоящее время производственные возможности корпуса оптимизированы для сборки одной ракеты в месяц, однако ее темп может быть без труда увеличен до одной ракеты в неделю.

Специальный трейлер используется не только для сборки, но и для транспортировки ракеты к месту подвески на самолет-носитель. Процедура подвески начинается за 2 часа до взлета самолета и продолжается 60 мин. По завершении подвески РН «Пегас» начинает получать электропитание (постоянное напряжение 28 В) от бортовой сети самолета, а вычислительный комплекс соединяется с его бортовой ЭВМ. Постоянный контроль исправности бортовых подсистем РН осуществляет один из членов экипажа с помощью установленного на носителе контрольно-проверочного блока. Он же отвечает за своевременную передачу информации от ЭВМ самолета в запоминающее устройство бортового вычислительного комплекса ракеты. На основе докладов о текущем состоянии ее бортовых систем командир экипажа самолета-носителя принимает окончательное решение о пуске ракеты.

#### ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПОЛЕТА

Ракета-носитель «Пегас» с полезной нагрузкой подвешивается под правой консолью крыла самолета-носителя B-52. В полете с самолетного пульта управления вводятся полетные данные в систему наведения ракеты-носителя. Отделение ракеты от

самолета происходит на высоте 12.2 км при скорости, соответствующей  $M = 0.8$ . В течение 5 с она совершают свободное падение, и на расстоянии примерно 100 м ниже самолета включается РДТТ первой ступени. Двигатель первой ступени, содержащий 12.2 т твердого топлива, развивает среднюю тягу 50 т. К моменту окончания его работы ( $t = 76$  с) ракета достигает высоты 63 км и скорости  $M = 8.7$ .

До запуска РДТТ второй ступени полет ракеты в течение 5.8 с продолжается при управлении газоструйной реактивной системой. Запуск РДТТ второй ступени происходит на 87.1 с полета на высоте 70.4 км при угле наклона траектории  $25.9^\circ$ . Его топливо массой 3.02 т сгорает за 71 с, обеспечивая тягу 13.7 т (максимальная — 14.1 т). Ракета достигает высоты 168 км, скорости 5.43 км/с и угла наклона траектории  $18.4^\circ$ . При этом на 121 с полета на высоте 112 км и скорости 3.56 км/с происходит сбрасывание обтекателя полезной нагрузки. После окончания работы РДТТ второй ступени следует баллистическая фаза полета (по инерции с неработающим двигателем) продолжительностью 310.6 с, в конце которой носитель выходит на высоту 460 км при скорости 4.97 км/с. Топливо РДТТ второй ступени массой 0.77 т сгорает за 64 с и создает тягу 4.1 т. Это позволяет после 534 с момента отделения от самолета-носителя довести скорость полета ракеты до 7.62 км/с и вывести полезную нагрузку 270 кг на полярную орбиту высотой около 460 км.

Необходимо отметить, что приведенная выше схема полета трехступенчатой РН «Пегас» является типовой и уточняется для каждого конкретного пуска.

Для примера на рис. 5 показана схема полета РН «Пегас» при выводе полезной нагрузки на орбиту высотой 740 км, а в табл. 2 приведена типовая

Таблица 2. Основные этапы полета ракеты-носителя «Пегас»

Время полета $T$ , с	Этап полета	Высота, км	Скорость, км/с, число $M$	Угол наклона траектории, град
0	Отделение ракеты от самолета	12.6	0.23, $M = 0.8$	
5	Запуск РДТТ первой ступени	12.5	0.24, $M = 0.8$	
84	Отключение РДТТ и отделение первой ступени	47.8	2.36, $M = 7.7$	
106	Запуск РДТТ второй ступени	62.8	2.3	13.8
193	Отключение РДТТ и отделение второй ступени	101.6	5.22	3.6
210	Сброс головного обтекателя			
213	Запуск РДТТ третьей ступени	106.7	5.21	2.4
283	Отключение РДТТ и отделение третьей ступени	112.4	7.8	0.25
290	Первое включение ЖРД блока HAPS	112.5	7.8	0.25
241	Отключение ЖРД	115.7	8	0.43
3040	Второе включение ЖРД блока HAPS	740	7.3	0.1
3150	Отключение ЖРД. Отделение полезного груза	740.8	7.5	0

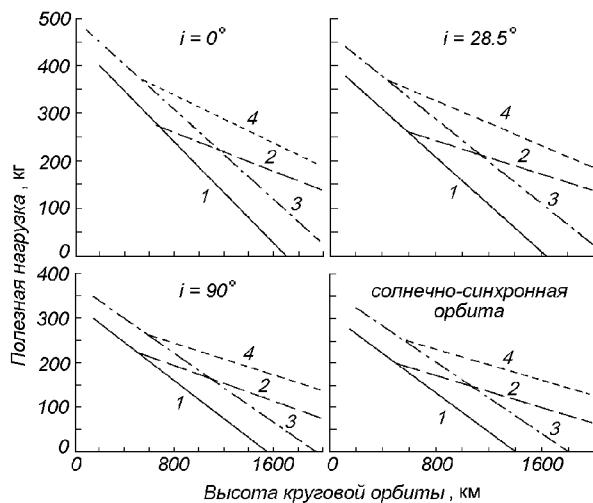


Рис. 6. Энергетические характеристики РН «Пегас»: 1 — Базовая РН «Пегас»; 2 — Базовая РН «Пегас» + HAPS; 3 — РН «Пегас-XL»; 4 — РН «Пегас-XL» + HAPS

схема полета четырехступенчатой РН «Пегас» (с дополнительной четвертой жидкостной ступенью HAPS).

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 6 приведены энергетические характеристики четырех эксплуатируемых в настоящее время модификаций ракет-носителей семейства «Пегас» для различных наклонений орбит:

- базовая, трехступенчатая РН «Пегас»;
- 4-ступенчатая РН «Пегас» (базовая РН «Пегас» + разгонный блок HAPS);
- базовая, трехступенчатая РН «Пегас-XL»;
- 4-ступенчатая РН «Пегас-XL» (базовая РН «Пегас-XL» + разгонный блок HAPS).

1. Испытания и использование ракеты «Пегас» // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1989.—№ 40.—С. 6—9.
2. Кистанов В. Ракета-носитель воздушного запуска «Пегас» // Зарубежное военное обозрение.—1991.—№ 9.—С. 34—38.
3. О ракете-носителе «Пегас», запускаемой с самолета // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1988.—№ 45—46.—

С. 18—22.

4. «Пегас» — новая американская транспортная космическая система // ЭИ Бортовые и наземные системы управления.—1988.—№ 20.—С. 10—14.
5. Планы эксплуатации ракет-носителей легкого класса // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1993.—№ 27.—С. 1—16.
6. Разработка твердотопливной космической ракеты «Пегас» // ЭИ Новости машиностроения. Сер. Наука и техника.—1989.—№ 23.—С. 7.
7. Ракета-носитель «Пегас» // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1990.—№ 38—39.—С. 7—16.
8. Ракета-носитель «Пегас», запускаемая с самолета // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1988.—№ 41.—С. 11—15.
9. Ракеты-носители, запускаемые с самолета, и проект ракеты «Пегас» // ЭИ Ракетная и космическая техника.—1988.—№ 31—32.—С. 22—24.
10. Старостина Л. И. Ракеты-носители воздушного старта // ОНТИ КБ «Южное».—1993.—Сер. X11.—№ 263.—С. 5—36.
11. Air-Launched Space Booster «Pegasus» // Orbital Sci. Corporation.—1989.—Р. 1—4.
12. Jane's SpaceFlight Directory.—1993—1994.
13. Linberg R. E. Pegasus. Overview of the Pegasus air-launched space booster // SAE Techn. Pap. Ser.—1989.—N 392308.—Р. 1—6.
14. Pegasus Bearer // Flight International.—1993.—22—28 September.—Р. 46—49.
15. Pegasus winged workhorse // Flight International.—1988.—134, N 4126.—Р. 29—31.
16. Pegasus XL Success opens door to fast-paced launch schedule // Aviation Week and Space Technology.—1996.—March 18.—Р. 26—27.
17. Satellites Appear doomed after Pegasus XL mishap // Aviation Week and Space Technology.—1996.—November 11.—Р. 28.
18. Schade C. Pegasus, Taurus and Glimpses of the future // AIAA.—1990.—N 3573.—Р. 1—10.
19. The Pegasus launch vehicle // Spaceflight.—1989.—31.—Р. 89—92.

#### AEROSPACE SYSTEM «PEGASUS». REVIEW BASED ON FOREIGN PRESS MATERIALS FOR 1988—1996. II. CHARACTERISTICS AND CONSTRUCTION FEATURES

V. P. Gusynin

Basic characteristics and construction features of unique aerospace system «Pegasus» the only one in operation at the moment are considered. The data are given about the arranging diagram, control system, technology, materials used, performance characteristics, as well as the standard flight program and some features of the ground service of the aerospace system.

УДК 528.8.003:553.98

## Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы

**В. М. Перерва**

Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН Національної академії наук України, Київ

*Надійшла до редакції 05.09.97*

На прикладі деяких регіонів (Чорне море, Західний Сибір) показана роль супутникової інформації в ефективному вивченні флюїдопровідних структур літосфери. Важливість вивчення вказаних структурних утворень літосфери зумовлена великою їх роллю у розвитку багатьох геологічних, геоморфологічних та геофізических процесів (розташуванні родовищ корисних копалин, розвитку ерозійних процесів і формуванні окремих форм рельєфу, геопатогенних зон та ряду інших). Для ефективного використання супутникової інформації у вирішенні важливих практичних і наукових завдань необхідна розробка технологій її використання на рівні фундаментальних та прикладних досліджень.

Дистанционное зондирование Земли космическими аппаратами в различных зонах спектра электромагнитных колебаний является, как показывает более чем 20-летний опыт, весьма эффективным методом изучения важнейших природных и техногенных процессов, позволяющим получить информацию, ранее не известную ряду отраслей науки.

Например, только на основе спутниковой информации впервые была получена наиболее полная адекватная картина разломно-блоковой структуры литосферы, ее новейших и современных движений, развития флюидопроводящих структур. Это позволило более эффективно решать задачи нефтегазовой, рудной и инженерной геологии, сейсмологии (строительство и эксплуатация атомных электростанций, крупных гидротехнических сооружений, определение закономерностей размещения промышленных скоплений углеводородов и другие).

Существует мнение, что сегодня в решении научных и практических задач ограничивающим фактором выступает острый дефицит объема финансирования. Это так, но именно этот фактор обязывает вводить строгий режим экономии, принятия решений по тем или иным отраслевым проблемам лишь на научной основе, обеспечивающей получе-

ние оптимальных решений при минимальных финансовых затратах. В этой связи можно привести следующий пример. Затраты на бурение одной нефтегазопоисковой и разведочной скважины на глубину около 4 км в условиях Днепровско-Донецкой впадины составляют около 3 млн грн. При недостаточной обоснованности продуктивности такая проектируемая скважина может по результатам бурения оказаться не продуктивной («пустой»), что нередко и происходит. В этом случае затраты оказываются неоправданными. Но в то же время космогеологическая наука располагает средствами оценки продуктивности проектных площадей и скважин, что позволяет в определенной мере исключить бурение «пустых» скважин и сэкономить средства. При этом затраты на оценку продуктивности объекта (скважины или площади) по спутниковым данным составляют 0.5 % от стоимости бурения скважины, т. е. около 15 000 грн.

Спутниковая информация позволяет рассматривать многие проблемы с новых научных позиций. Одним из ярких примеров этого в геологической науке является изучение флюидопроводящих структур литосферы. Научная и практическая значимость этой проблемы определяется той важной

ролью, которую играют флюидопроводящие структуры в развитии многих геологических процессов, и, что наиболее важно, в формировании месторождений полезных ископаемых [3]. Изучение этих структур дистанционными методами, определение при этом закономерностей их размещения позволяет оптимизировать процесс поиска месторождений полезных ископаемых, т. е. осуществлять процесс в оптимальном режиме, с использованием новейших технологий поиска [4].

Вопрос физической сущности флюидопроводящих структур, как своеобразных образований в литосфере является в настоящее время довольно сложным и неоднозначным. Ряд исследователей статус флюидопроводящих структур придают определенным морфогенетическим типам разрывных нарушений. Однако, как показали многочисленные спутниковые данные, позволяющие наиболее полно изучать линеаментную сеть планеты, рассмотрение флюидопроводящих структур лишь в качестве разрывных нарушений, и следовательно, с наличием обязательного условия разрывного нарушения — амплитуды перемещения слоев горных пород, является не полным, частичным. По ряду регионов (Северо-Западный шельф Черного моря, Днепровско-Донецкая впадина, Западно-Сибирская плита) установлено, что вертикальная миграция пластовых и глубинных флюидов отмечается в пределах линеаментов, не обладающих указанными качествами разрывного нарушения. В пределах таких линеаментов фактором, обеспечивающим формирование путей миграции флюидов, являются лишь процессы разуплотнения пород, без признаков разрывных нарушений. По этой причине многие линеаменты, выявленные по данным спутниковой информации, не находят своего выражения на материалах сейсморазведочных работ.

Таким образом, нами под флюидопроводящими структурами понимаются линейные зоны разуплотнения пород, фиксируемые дистанционными методами в виде линеаментных зон. Развитие разрывных нарушений по этим зонам в хронологическом аспекте является последующим процессом, развивающимся избирательно по некоторым зонам разуплотнения. Формирование зон разуплотнения представляется, таким образом, как начальная фаза деструкции литосферы, обуславливающая утрату ею качеств флюидоупора и снижение прочностных характеристик в пределах этих зон.

Флюидопроницаемость линейных зон разуплотнения (линеаментов) является одним из важных качеств, обуславливающих их выражение на материалах аэрокосмосъемок. Мигрирующие по ним жидкие и газообразные пластовые и глубинные

флюиды, достигая дневной поверхности, обуславливают аномальные изменения спектральных характеристик компонентов ландшафта (приемущественно растительности). В этой связи напрашивается небезынтересный вывод: не является ли факт широкого планетарного и закономерного развития линеаментов — зон разуплотнения и флюидопроницаемости литосферы следствием проявления процессов расширения планеты на современном этапе?

В наибольшей степени флюидопроницаемость литосферы проявляется в узлах пересечения зон разуплотнения — геодинамических узлах.

На основе изучения информации по дистанционному зондированию исследуемых территорий впервые удалось получить изображение (космический портрет) геодинамических узлов как флюидопроводящих структур литосферы (рис. 1). Если ранее пространственное положение этих структур определялось графически на участке пересечения дешифрированных линеаментов, что не является обязательным признаком геодинамического узла как флюидопроводящей структуры, то на основе целенаправленного изучения материалов аэрокосмосъемок с использованием геоиндикационных признаков флюидопроводящих структур их положение и опознание выполняется наиболее достоверно. Более того, удается определить не только пространственное положение флюидопроводящей структуры, но и, что весьма важно, ее строение.

Так, в приведенном примере (рис. 1) флюидопроводящей структуры (геодинамического узла), расположенной в районе Тендровской косы (Северо-Западный шельф Черного моря), отчетливо прослеживается гетерогенный характер этого образования. Обусловлен он чередованием участков высокой и низкой флюидопроводимости литосферы в зоне геодинамического узла. Участки высокой проницаемости пород получили название очагов разуплотнения [4]. Как видно, определение обобщенного контура флюидопроводящей структуры, без определения ее внутреннего строения (положения очагов разуплотнения) не решает задачи требуемого изучения флюидопроводящих структур и определения их практического значения (прогнозирование участков развития вторичных коллекtorов и другие). Эта задача наиболее важна для тех регионов, в которых обнаружены промышленные скопления углеводородов, связанные с вторичными коллекtorами в образованиях кристаллического фундамента и прилегающих отложениях осадочного чехла (месторождения Чернетчинско-Хухринское, Юльевское и некоторые другие в Днепровско-Донецкой впадине).

Получение ландшафтного изображения геодина-

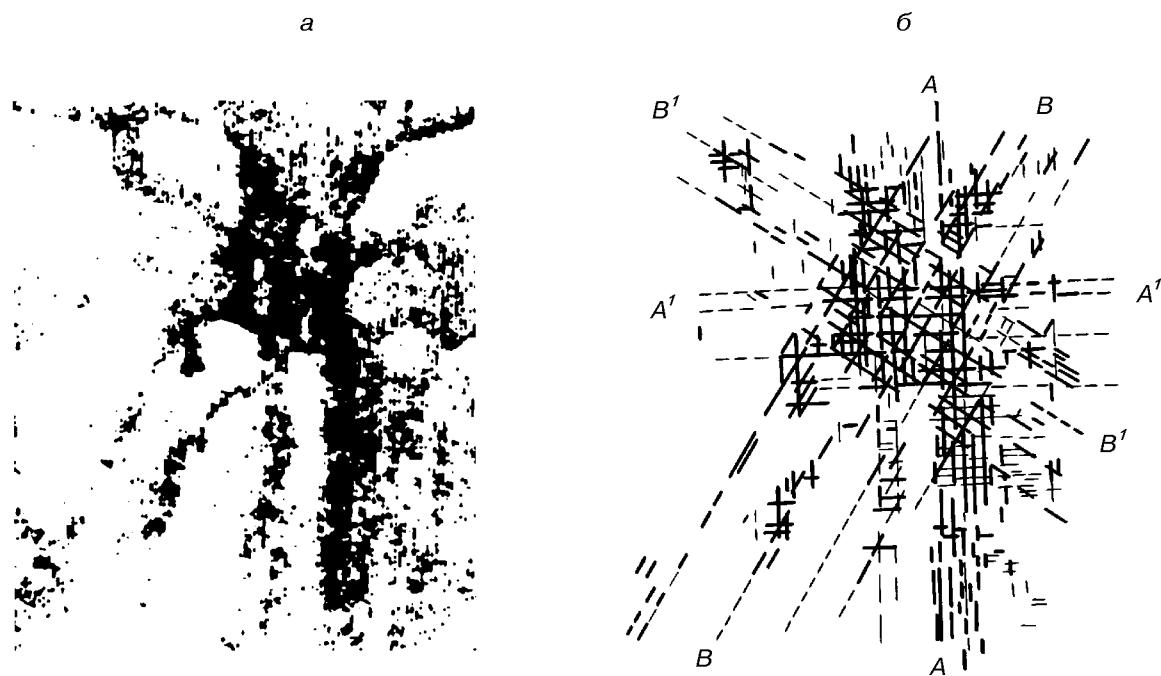


Рис. 1. Космическое изображение (а) и схема дешифрирования геодинамического узла (б) (Северо-Западный шельф Черного моря, район Тендровской косы)

мических узлов, а впервые это удалось выполнить на космических изображениях морского дна, где, как уже отмечалось, отсутствуют техногенные факторы, развиты иные, более благоприятные физико-химические условия ландшафтов по сравнению с сушей. Это обеспечивает лучшую сохранность в облике ландшафта морфогенетической связи последних с геологической структурой, позволяет отчетливо проследить связь геодинамических узлов с линейными зонами разуплотнения в литосфере либо с разрывными нарушениями, осложняющими эти зоны. На рис. 1, б видна связь геодинамического узла с двумя наиболее выраженными ( $A-A'$ ) тектонопарами (одна образована меридиональной и широтной зонами, другая — двумя диагональными ( $B-B'$ )).

Важным вопросом в проблеме изучения геодинамических узлов как флюидопроводящих структур литосферы является определение характера физико-химических процессов и геофизических полей, развивающихся в зоне этих структур. Известно, что в большинстве случаев они имеют аномальную характеристику, обуславливающую формирование определенных, характерных лишь для флюидопроводящих структур, а поэтому имеющих признак геоиндикации, форм современного ландшафта (как для подводных ландшафтов, так и для суши).

Пожалуй, основными факторами, обуславливающими ландшафтное выражение флюидопроводящих структур литосферы, являются геодинамические и флюидодинамические процессы, развивающиеся аномально в пределах этих структур.

Геодинамические процессы, формирующие флюидопроводящие структуры, характеризуются аномальным проявлением вектора растяжения в поле напряжений литосферы, что приводит к разуплотнению пород в пределах этих аномальных участков и, как следствие, последующему развитию флюидодинамических процессов.

Флюидодинамические структуры обусловливают гидродинамическую связь природных резервуаров различных гипсометрических и стратиграфических уровней литосферы, а также горизонтов верхней мантии.

В современном рельфе суши флюидодинамические структуры обусловливают развитие характерных форм. Наиболее ярко они проявляются в пределах равнинных территорий. В качестве примера рассмотрим форму ландшафтного выражения геодинамического узла (флюидопроводящей структуры) на площади Каменной Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (рис. 2). На этой площади в зоне геодинамического узла можно наблюдать развитие характерных ландшафтных микро-

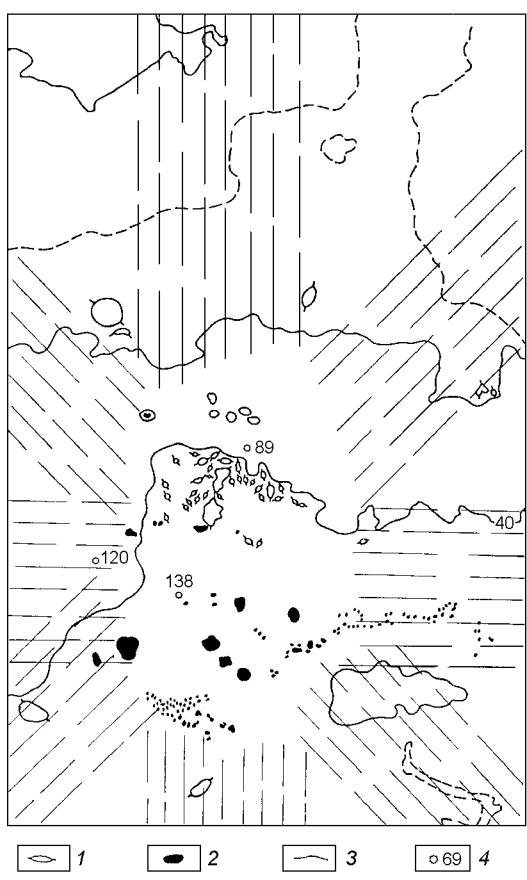


Рис. 2. Форма ландшафтного выражения геодинамического узла на площади Каменной Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции: 1 — микровозвышенность, 2 — озера, 3 — горизонтали рельефа, 4 — скважина и ее номер

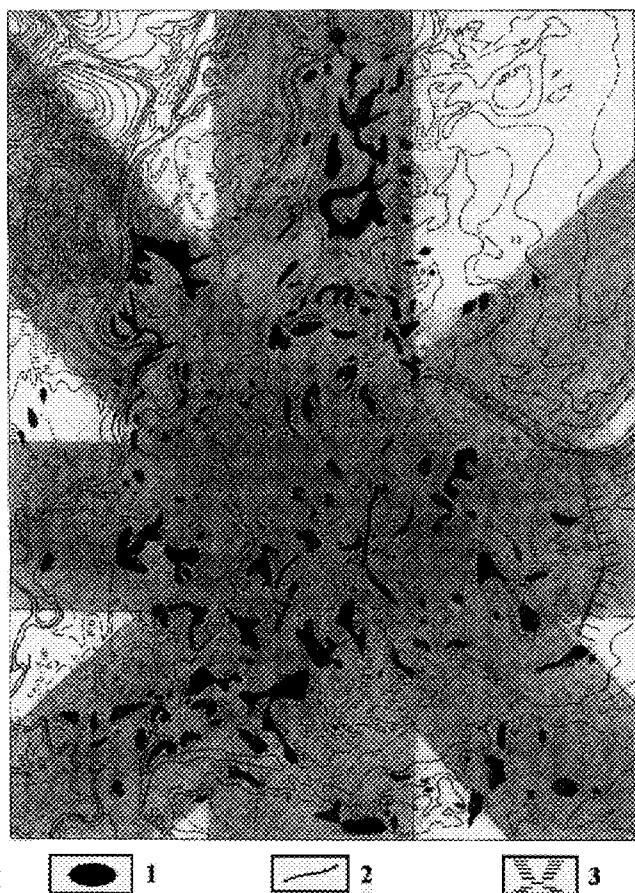


Рис. 3. Форма ландшафтного выражения геодинамического узла на площади Хухрянской Днепровско-Донецкой впадины: 1 — микроформы рельефа, 2 — горизонтали, 3 — участки повышенного увлажнения

форм: отдельных небольших возвышений. При этом весьма характерно, что длинные оси микровозвышенностей ориентированы в направлении того или иного разрывного нарушения,участвующего в формировании флюидопроводящей структуры. На фоне спокойного равнинного рельефа площади отчетливо проявляется аномальное изменение характера рельефа. Причем, как видно, формируются не только положительные, но и отрицательные микроформы (мелкие озера). Их формирование обусловлено аномальным проявлением на этом участке площади процессов разуплотнения антропогенных отложений, их повышенной гидроморфности, развитием процессов выноса вещества из зоны геодинамического узла. Примечательно, что ориентировка длинных осей этих озер подчинена той же закономерности, что и осей микровозвышенностей, т. е. в соответствии с простиранием того или

другого разрывного нарушения. Как видно, немаловажную роль играют процессы разуплотнения и последующие обусловленные ими явления в приповерхностных отложениях в формировании озер Западно-Сибирской низменности и других территорий. За счет тектонической деструкции пород, их разуплотнения и последующего выноса вещества происходит развитие процессов карстообразования. В случае приуроченности современных береговых линий крупных озер и морей к геодинамическим узлам нередко наблюдается формирование мелких заливов, бухты (бухты района г. Севастополя и другие).

Практически однотипный характер выражения флюидопроводящих структур можно наблюдать в Днепровско-Донецкой впадине (рис. 3), характеризующийся иными ландшафтными условиями по сравнению с Западно-Сибирской низменностью. В

в этом регионе также на участках флюидопроводящих структур отмечается аномальный характер изменения общего рисунка рельефа: появление по сравнению со смежными участками мелких форм рельефа (микровозвышеностей, микрозападин), ориентированных также в направлении развитых здесь разрывных нарушений, сформировавших флюидопроводящую структуру. Как видно, в зоне флюидопроводящей структуры в силу развивающихся в ее пределах аномальных физико-химических процессов происходит формирование характерных черт рельефа, свойственных лишь флюидопроводящим структурам (геодинамическим узлам). Эти черты, или ландшафтные признаки, уверенно дешифрируются на материалах аэрокосмических съемок, создавая основу геоиндикации флюидопроводящих структур.

Выше отмечалось, что в условиях подводных ландшафтов в силу резкого отличия физико-химических процессов, действующих на современный рельеф, по сравнению с сушей, наблюдается значительное отличие степени выражения геодинамических узлов на материалах космических и воздушных съемок. В условиях морской среды, благоприятствующей некоторой консервации форм рельефа, сохраняются в первозданном облике многие разновеликие морфоструктуры, не сохраняющиеся или значительно видоизмененные на суше (уступы тектонической природы, мелкие горсты, грабены и другие). Это обстоятельство, как уже отмечалось, способствует более полному выражению геодинамических узлов в современном рельефе морского дна и более углубленному их изучению аэрокосмическими методами.

Более полное выражение геодинамических узлов на космофотоизображениях морского дна позволяет более уверенно проследить контролирующую роль тектонического фактора и сопутствующих ему процессов в формировании как в целом береговой линии Черного и Азовского морей, так и более мелких прибрежных форм рельефа (кос, заливов, бухт и т. п.).

В настоящее время существует несколько концепций формирования кос этих акваторий, дискуссионным вопросом в которых является роль тектонического фактора. Рядом исследователей роль этого фактора отрицается полностью. По нашему мнению, формирование этих кос обусловлено воздействием суммы факторов, имеющих различную природу (тектоническую, гидрофизическую и другие), т. е. их формирование является следствием сложного взаимодействия и взаимообусловленности большого ряда процессов, развивающихся как в литосфере, так и в морской среде.

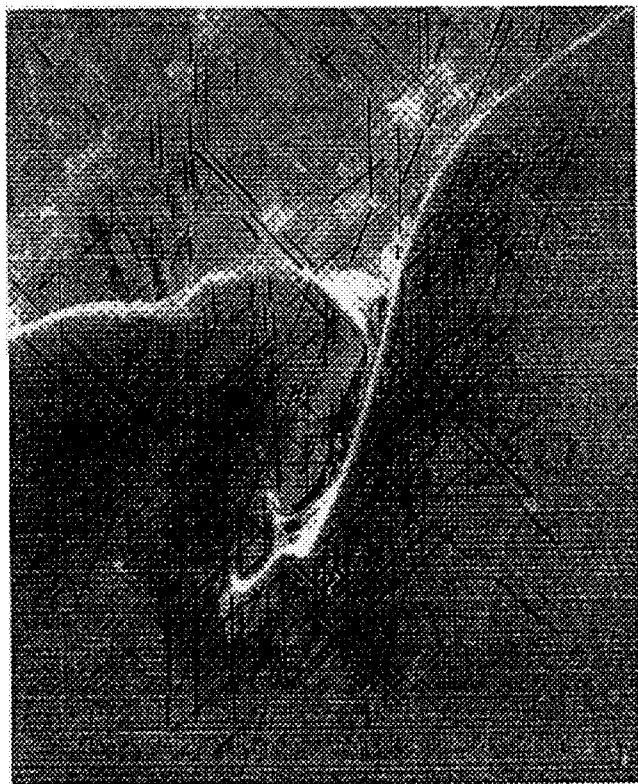


Рис. 4. Схема геодинамической ситуации на участке косы Обиточной в Азовском море (по материалам космической съемки)

Рассмотрение этого вопроса связано не только с научной, но и с практической значимостью вопроса формирования кос (например, изучение проблемы равновесного состояния экосистемы азово-черноморского региона).

Так, нашими исследованиями было установлено, что все косы как Азовского, так и Черного морей располагаются в пределах геодинамических узлов и образующих их разломов. Наглядно эта ситуация, в частности, просматривается в пределах косы Обиточной (рис. 4). Как для этой, так и для других кос, характерным в их конфигурации является наличие четко обозначенной расширенной головной части косы и очень узкой полосы, соединяющей головную часть косы с материком. Этот признак конфигурации кос обусловлен расположением головной части косы в центральной части геодинамического узла, а остальной ее части, имеющей форму узкой полосы, — по периферии геодинамического узла, контролируемой в большей мере отдельными

разломами. Приуроченность косы к геодинамическому узлу обусловлена комплексом физико-химических процессов и геофизических полей, развивающихся в пределах указанных структурных форм литосферы. Эти процессы вызывают аккумуляцию обломочного материала на участках их наибольшего проявления и влияния на процессы разноса обломочного материала. Наиболее главными из этих процессов-факторов являются следующие.

Выполненные аэрокосмогеологическими и гидрофизическими исследованиями в Азовском и Черном морях установлены процессы вертикальной миграции пластовых и глубинных газообразных флюидов через толщу морских вод [2, 5]. Газовые струи пронизывают толщу морских вод от дна до поверхности. В зоне газовых струй плотность морских вод понижена. Как правило, указанные струи на морском дне приурочены к субвертикальным флюидопроводящим структурам литосферы (геодинамическим узлам). В зоне флюидопроводящих структур (геодинамических узлов и отдельных разрывных нарушений) в силу пониженной плотности морских вод происходит аномальная аккумуляция обломочного материала, разносимого вдольбереговыми морскими течениями (рис. 5).

Вторым фактором, контролирующим формирование песчаных образований в указанных акваториях, является аномальный характер некоторых геофизических полей в зоне как геодинамических узлов, так и отдельных разрывных нарушений. Так, исследованиями [1] установлен, например, факт аномального характера электростатического поля в зонах разрывных нарушений. Обломочный материал, попадая в зону аномального электростатического поля, подвергается процессам аномальной аккумуляции. По нашему мнению, так идет формирование кос Черного и Азовского морей. Указанная схема не исключает возможности воздействия на эти процессы и других факторов, однако рассмотренные факторы являются основополагающими. По этой схеме, вероятно, идет формирование не только песчаных кос, но и песчаных банок и других форм рельефа морского дна.

В условиях сложного гидрофизического режима указанных морей (штормы зимних и осенних периодов) сохранение кос обеспечивается преобладанием факторов созидания над факторами разрушения. Процессы, обусловленные указанными двумя группами факторов, развиваются одновременно, в постоянном противодействии.

Резюмируя вышеизложенное, заключаем, что в настоящее время спутниковая информация является одной из наиболее эффективных в изучении важнейших структурных образований литосферы

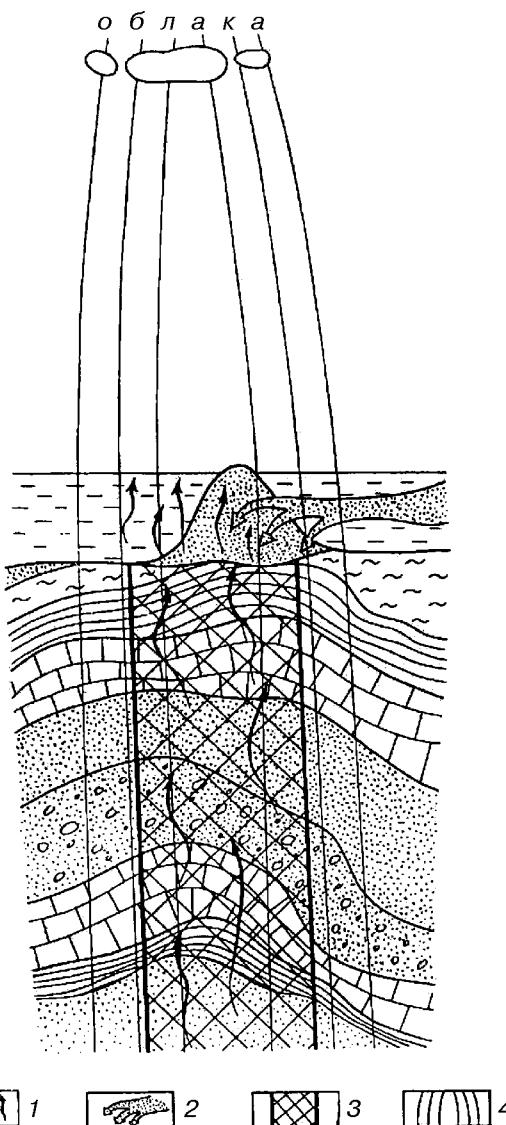


Рис. 5. Принципиальная схема воздействия флюидодинамических процессов и электростатического поля разломов литосферы на формирование кос Черного и Азовского морей: 1 — вертикальный миграционный поток пластовых и глубинных флюидов, 2 — направление разноса обломочного материала, 3 — зона глубинного разлома, 4 — схематизированные линии геофизических полей

— флюидопроводящих структур. Изучение флюидопроводящих структур дистанционными методами, как новое и важное научное направление, позволяет расширить знания о строении литосферы, эффективно использовать эти знания в научной и практической деятельности, познать новые процессы и явления в природе, и что не менее существ-

венно, — решать ряд практических задач с наименьшими затратами.

1. Пазинич В. Г. Геофізика явища еолової акумуляції. — Кіїв, 1994.—47 с.—(Препрінт / Геопрогноз).
2. Перерва В. М. Аномалії температури морської поверхності Чорного моря як геоіндикаторы структури земної кори і скоплений углеводородов // Геолог. журн.—1993.—№ 6.—С. 46—52.
3. Перерва В. М. Флюїдопровідні структури літосфери та їх роль у формуванні родовищ корисних копалин // Мінеральні ресурси України.—1997.—№ 1-2.—С. 24—30.
4. Перерва В. М., Лялько В. І., Филиппович В. Е., Шпак П. Ф. Інформація ІСЗ «Січ-1» в розв'язанні актуальних проблем нефтегазової геології // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 3-4.—С. 49—54.
5. Г. Г. Поликарпов, О. Г. Миронов, В. Н. Егоров и др. Молісмологія Чорного моря. — Київ: Наук. думка, 1992.—304 с.

**SPACE INFORMATION IN THE INVESTIGATION  
OF FLUID-CONDUCTING LITHOSPHERE STRUCTURES  
AND SOME PROBLEMS  
OF UPGRADING THE EFFICIENCY  
OF ITS USE**

**V. M. Pererva**

The importance of space information in an efficient investigation of fluid-conducting lithosphere structures is demonstrated with the use of some regions (the Black Sea, Western Siberia) as an example. These lithosphere structures play a large part in the development of numerous geological, geomorphological, and geophysical processes (e. g., the location of mineral deposits, development of erosion processes, formation of certain relief formations and geopathogenous zones, etc. For the space information to be used efficiently in the solution of most important practical and scientific problems, the techniques of its application need to be developed at the level of fundamental and applied investigations.