

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ISSN 2542-2068

ISSN 2542-2068

Відомості про журнал: заснований у 1995 році. Це єдиний український журнал, який висвітлює питання космічної науки та технологій.

КИЇВ

№ 3, 1997

КІЇВ

ЗМІСТ

Укази Президента України

Кордюм Є. Л. Космічна біологія: сучасний стан в світі та України

Фролькіс В. В., Мурадян Х. К., Тимченко А. Н., Мозжухина Т. Г. Влияние гипергравитационного стресса на интенсивности газообмена, биосинтеза РНК и белка, терморегуляцию и выживаемость у животных разных видов

Гвоздяк Р. І., Коробко О. П., Азімцев О. Г. Бактеріальне ураження огірків в умовах космічного польоту

Фролькіс В. В., Мурадян Х. К., Тимченко А. Н., Жеребицкая Е. И., Лимарева А. А. Геропротекторы как гравипротекторы?

Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Кардаш О. Р., Чабан Х. І. Гравічутлива протонема моху — модельний об'єкт космічної біології

Лялько В. І., Федоровський О. Д., Сіренко Л. Я., Рябоконе́нко О. Д., Костиюченко Ю. В., Якимчук В. Г. Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водохоронних завдань

CONTENTS

3 Decrees of the President of Ukraine

5 Kordyum E. L. Space biology: Current status in the World and in Ukraine

16 Frolikis V. V., Muradian Kh. K., Timchenko A. N., Mozhukhina T. G. Effects of hypergravity stress on intensities of gaseous exchange, rna and protein synthesis, thermoregulation, and survival of animals of different species

22 Gvozdiak R. I., Korobko A. P., Azimtscev A. G. Bacterial disease of cucumbers in space-flight conditions

28 Frolikis V. V., Muradian Kh. K., Timchenko A. N., Zherebitskaia E. I., Limareva A. A. Geroprotectors as graviprotectors?

34 Demkiv O. T., Khorkavtsiv Ya. D., Kardash O. R., Chaban Kh. I. Gravity sensitive moss protonema — a model object of the space biology

40 Lialko V. I., Fedorovskii O. D., Sirenko L. Ya., Riabokonenco O. D., Kostyuchenko Yu. V., Yakymchuk V. H. Using the space information for solving the problems of water management and water guard



УКАЗИ
ПРЕЗИДЕНТА **УКРАЇНИ**

**Про заходи щодо дальшого
розвитку космічних технологій**

З метою забезпечення впровадження супутникових технологій для підтримання інформаційного простору держави та підвищення якості телекомунікаційних послуг **ПОСТАНОВЛЯЮ:**

1. Покласти на Національне космічне агентство України (далі — НКАУ) здійснення єдиної державної науково-технічної політики щодо створення та експлуатації супутникових систем зв'язку та теле-радіомовлення для забезпечення функціонування інформаційного простору держави.
2. Уповноважити НКАУ представляти інтереси держави в міжнародних організаціях, які здійснюють діяльність у сфері дослідження та використання космічного простору, експлуатації супутникових систем.
3. НКАУ забезпечити, починаючи з 1997 року, впровадження супутникових телекомунікаційних техно-логій для:

створення державної системи контролю космічного простору та орбітографії;
створення та підтримання цілісності державного навігаційного поля та системи єдиного часу;
створення супутникових мереж зв'язку з забезпеченням виходу до глобальних міжнародних інформаційних мереж для органів виконавчої влади та державних підприємств, установ та організацій;
розгортання супутникових розподільних мереж радіомовлення та телебачення;
забезпечення дипломатичних представництв та консульських установ України за кордоном супутниковим зв'язком та телерадіомовленням.

4. Кабінету Міністрів України:

забезпечити в 1997 році представництво НКАУ в таких міжнародних організаціях: Міжнародній організації морського супутникового зв'язку (ІНМАРСАТ), Міжнародній організації зв'язку через штучні супутники Землі (ІНТЕЛСАТ), Європейській організації супутникового зв'язку через штучні супутники Землі (ЄВТЕЛСАТ), Міжнародній організації космічного зв'язку (ІНТЕРСУПУТНИК), Міжнародній організації супутникового зв'язку («АЙКО»);
підготувати пропозиції щодо внесення змін до Положення про Національне космічне агентство України, що випливають з цього Указу.

Президент України

Л. КУЧМА

м. Київ
4 березня 1997 року
№ 202/97

Про заходи щодо забезпечення підготовки та проведення спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл»

З метою дальшого розвитку співробітництва між Україною і Сполученими Штатами Америки у дослідженні та використанні космічного простору в мирних цілях та виконання відповідних угод і домовленостей в космічній галузі **ПОСТАНОВЛЯЮ:**

1. Створити Державну комісію з підготовки та проведення спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл», поклавши на цю комісію забезпечення оперативного вирішення питань щодо виконання програми українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл» в 1997 році.

2. Затвердити персональний склад Державної комісії з підготовки та проведення спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл» (додається).

3. Кабінету Міністрів України:

розробити у місячний строк план заходів щодо спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл»;

визначити і подати у двомісячний строк на затвердження персональний склад української делегації для участі в заходах щодо підготовки та польоту космічного корабля «Шатл»;

розробити у двомісячний строк та подати в установленому порядку проект нормативно-правового акта про статус космонавта-дослідника України;

забезпечити у третьому кварталі 1997 року цільове фінансування заходів щодо завершення підготовки та здійснення спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл».

4. Національному космічному агентству України:

завершити у двомісячний строк розробку та погодження наукової програми спільних експериментів, забезпечити виготовлення та випробування необхідного обладнання і наукової апаратури;

завершити спільно з Національним комітетом США з аеронавтики та дослідження космічного простору (NASA) підготовку українських космонавтів (основного і дублера) і команди забезпечення.

5. Міністерству закордонних справ України забезпечити дипломатичну і консульську підтримку заходів щодо проведення завершального етапу спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл».

Президент України

м. Київ
28 липня 1997 року
№ 713/97

Л. КУЧМА

СКЛАД

Державної комісії з підготовки та проведення
спільних українсько-американських експериментів на борту космічного корабля «Шатл»

ТИГІПКО Сергій Леонідович — Віце-прем'єр-міністр
України, голова Держкомісії
НЕГОДА Олександр Олексійович — генеральний директор
Національного космічного агентства України,
заступник голови Держкомісії

ЧЛЕНИ КОМІСІЇ:

ЗГУРОВСЬКИЙ Михайло Захарович — Міністр освіти
України
КУЛИК Зіновій Володимирович — Міністр інформації
України

МІТЮКОВ Ігор Олександрович — Міністр фінансів України
ОСТАПЕНКО Дмитро Іванович — Міністр культури
і мистецтв України
ПАТОН Борис Євгенович — Президент Національної
академії наук України
УДОВЕНКО Геннадій Йосипович — Міністр закордонних
справ України
ХУДОЛІЙ Дмитро Андрійович — Голова Державного
комітету зв'язку України

УДК 581.17

Космічна біологія: сучасний стан в світі та Україні

Є. Л. Кордюм

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Київ

Надійшла в редакцію 21.07.97

Розглядаються основні напрямки досліджень в галузі космічної біології в світі та її стан і перспективи розвитку в Україні. Висвітлюються головні завдання з космічної біології в Державній космічній програмі України та міжнародні зв'язки українських вчених в цій галузі.

ВСТУП

На протязі чотирьох десятиріч космічної ери на борту штучних супутників Землі (біосупутники серії «Космос» — «Біон-1»—«Біон-11»), космічних кораблів одноразового використання («Восток», «Восход», «Зонд», «Союз», «Дискаверер», «Біосателіт-II», «Скайлаб-3», «Скайлаб-4», «Аполлон») та багаторазового типу «Шаттл», а також орбітальних станцій «Салют» та «Мир» здійснений широкий діапазон біологічних експериментів в рамках нової галузі біології — космічної, яка сьогодні є однією з найактуальніших в системі космічних наук. Вивчаючи біологічні ефекти факторів космічного польоту, в першу чергу мікрогравітації та важкого компонента космічної галактичної радіації, з якими живі системи не стикалися на Землі, космічна біологія, виникнення якої обумовлене науково-технічним прогресом та безпосередньо пов'язане з проникненням людини у космічний простір, одержує принципово нову наукову інформацію. Вона є надзвичайно важливою для з'ясування фундаментальних проблем сучасної біології та є базовою для розробки космічних клітинних біотехнологій та контрольованих екологічних систем життєзабезпечення людини в космічних літальних апаратах, значення яких тепер різко зросло у зв'язку з планами пілотованих польотів в далекий космос, відвідання Місяця та Марса. Створення таких систем і біотехнологій та прогнозування надійності їх функціонування неможливі без глибоких знань щодо ступеня та спрямованості дії факторів космічного польоту на живі організми.

Дослідженнями в галузі космічної біології закладені експериментальні основи гравітаційної біології

(її виникнення відносять до 50-х років ХХ сторіччя), яка з'ясовує роль гравітації — кардинального постійно діючого геофізичного фактора — в існуванні живих систем. В космічну еру біологи одержали унікальну можливість досліджувати вплив невагомості і, отже, гравітації на просторову орієнтацію, фізіологію та біохімію організмів, морфогенез, клітинну репродукцію та диференціювання, тобто процеси, що лежать в основі росту і розвитку живих істот. Оскільки питання про ступінь спеціалізації організмів до гравітації уявляється найбільш суттєвим при з'ясуванні біологічних ефектів невагомості, об'єктами космічної біології є організми, різні за рівнем складності, — бактерії, найпростіші, гриби, нижчі та вищі рослини, комахи, земноводні, риби, птахи, ссавці, *in vivo* та *in vitro*. Крім експериментів в космічному польоті, провадяться наземні дослідження по моделюванню впливу окремих факторів польоту на біологічні системи.

В розвитку космічної біології, починаючи з кінця 1950-х років, умовно виділяють два етапи: 1) дослідження на організмах, які знаходилися в стані спокою (тривалість експериментів від декількох діб до двох та більш років) та 2) дослідження на організмах, які ростуть та розвиваються на борту космічних літальних апаратів.

В результаті виконання робіт першого етапу (вивчення показників життєдіяльності організмів у післяпольотному періоді) показана принципова можливість тривалого перебування бактеріальних та рослинних організмів в стані спокою в космічному польоті без істотних порушень життєздатності популяцій після польоту. Саме дослідження другого етапу, виконані на різних за ступенем склад-

ності організмах, які знаходилися в активному фізіологічному стані під час польоту, дозволили виявити різнобічну дію факторів польоту на життєдіяльність та ріст живих систем (Газенко и др., 1974; Дубинин, Ваулина, 1976; Сытник и др., 1984; Halstead and Dutcher, 1984, 1987; Космонавтика СССР, 1987; Cogoli et al., 1990; Физиологические проблемы невесомости, 1990; Sievers and Hensel, 1991; Claasen and Spooner, 1992; Kordyum, 1997). В світлі знайдених закономірностей впливу окремих факторів космічного польоту на біологічні системи вищого та нижчого порядків було встановлено, що основними діючими факторами польоту є невагомість та космічна радіація. В ході дискусії, яка велася з початку 1970-х років щодо питань індивідуальності або чутливості клітин до невагомості і, отже, гравітації, на основі експериментальних даних було визнано, що клітина є гравічутливою. Тому сьогодні можна говорити про реальність переходу до третього етапу у розвитку космічної біології, безпосередньо пов'язаного з відкриттям гравічутливості клітини, — пізнанням глибинних механізмів дії невагомості та гравітації на клітинному, субклітинному і молекулярному рівнях і створенню теоретичних уявлень щодо життєдіяльності, репродукції, росту і розвитку організмів в умовах невагомості.

На світовому рівні космічна біологія, як і інші напрямки природничих, технічних та суспільних наук, які створені космічним простуванням людства, є предметом діяльності кількох міжнародних організацій; з них основні — Міжнародна астронавтична федерація (МАФ), Міжнародна академія астронавтики (МАН) та Міжнародний комітет з космічних досліджень (КОСПАР). МАФ заснована в 1950 р.; її діяльність спрямовується на прискорення розвитку астронавтики в мирних цілях, широке розповсюдження технічної інформації, стимуляцію громадського інтересу до космічних польотів, організацію конгресів та симпозіумів, кооперацію з іншими організаціями в усіх аспектах природничих, технічних та соціальних наук, які мають відношення до астронавтики та мирного використання відкритого космосу. В серпні 1960 р. МАФ створила Міжнародну академію астронавтики, метою якої є сприяння розвитку астронавтики в мирних цілях, а також визначення осіб, які зробили значний внесок в космічну науку та технологію, забезпечення активної участі своїх членів в діяльності академії та роботи спеціалізованих комітетів з різних напрямків космічної науки, включаючи космічну біологію та медицину, кооперацію наукових досліджень шляхом проведення симпозіумів та нарад і т. д. Щорічно МАН разом з МАФ організовує Міжнародні астронавтичні конгреси, тру-

ди яких публікуються в спеціальних випусках журналу «Acta Astronautica».

В жовтні 1958 р. Міжнародна рада наукових спілок організувала КОСПАР для продовження міжнародної програми досліджень на ракетах та супутниках, яка успішно здійснювалася на протязі 1957—1958 рр. Було визначено, що першочергове завдання КОСПАР полягає в забезпеченні світової наукової спільноти умовами, за якими вона зможе використовувати можливості аеростатів, ракет, супутників та інших космічних апаратів для наукових досліджень та обмінюватися одержаною інформацією на базі співробітництва.

Діяльність КОСПАР відбувається за допомогою Наукових комісій, які сформовані за напрямками різних галузей науки та є відповідальними за міжнародну координацію експериментальних досліджень в космосі, підтримку взаємодії між експериментаторами та теоретиками для підвищення результативності космічних наукових досліджень, особливо в інтерпретації одержаних експериментальних даних, стимуляцію та координацію обміну науковою інформацією, організацію наукових симпозіумів та тематичних нарад для обговорення результатів космічних досліджень, підготовку матеріалів наукових форумів для видання в журналі «Advances in Space Researches», довідок про сучасний стан розвитку космічних досліджень для ООН тощо. Загальні наукові асамблеї КОСПАР проводяться з 1958 р., щорічно до 1979 р., а з 1980 р. — раз у два роки.

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ КОСМІЧНОЇ БІОЛОГІЇ В СВІТІ

В сьогоденній космічній біології можна виділити чотири основних розділи:

- гравітаційна біологія;
- радіаційна біологія;
- планетарна біологія та пребіотичний синтез,
- природні та штучні екосистеми

(саме таким розділам відповідають підкомісії Наукової комісії КОСПАР з космічної біології та медицини (Life Sciences as Related to Space), які практично охоплюють всі головні напрямки космічної біології та визначають коло її актуальних питань, що вирішуються на сучасному науково-методичному рівні.

Гравітаційна біологія. Досліджуються біологічні ефекти зміненої гравітації, в першу чергу реальної мікрогравітації (замість прийнятого раніше терміну «невесомість», оскільки в космічному польоті встановлена наявність певних прискорень, які виникають внаслідок роботи двигунів під час корекції траєкторії, наукового та технічного обладнання,

руху космонавтів тощо) в космічному польоті, симульованої мікрогравітації (кліностатування, гіпокінезія, ортостатика, водна імерсія та ін.) та підвищеної гравітації за допомогою центрифуг в наземних експериментах відносно людини, тварин, рослин, мікроорганізмів, культур тканин та клітин, що забезпечує широкі можливості для гравітаційної біології, а також вібрації. З'ясовується біологічне значення різних величин гравітації, нижчих за 1g, при використанні центрифуг в космічному польоті та встановлюються межі гравічутливості живих істот. Вивчаються механізми гравірецепції та просторового розташування організмів, реакції одноклітинних організмів та клітин в культурі на змінену гравітацію, розробляються теоретичні моделі дії гравітації на клітини. Дослідження проводяться на популяційному, організмовому, клітинному та молекулярному рівнях. Визначається роль гравітації у функціонуванні вестибулярного апарата людини та тварин, скелетно-м'язової, серцево-судинної, ендокринної, видільної, імунної та інших систем, а також значення цього фактору в ранніх стадіях онтогенезу рослин та тварин.

Радіаційна біологія. Вивчаються біологічні реакції на дію космічної радіації та біологічна ефективність її важкого компонента (важких заряджених часток або важких іонів з енергією порядку MeV та GeV) та продуктів ядерного розпаду в космічних польотах та наземних експериментах на ядерних прискорювачах шляхом опромінення біологічних об'єктів певними видами іонізуючої радіації з визначеними дозами та енергією. Пошкодження генетичного апарата важкими зарядженими частками виявляються в загибелі клітин, виникненні різного роду мутацій та новоутворень. Оскільки доля загиблих клітин значно нижча за долю мутацій, важкі іони є дуже небезпечними для живих істот. Сучасні польоти в близькому космосі відбуваються нижче радіаційних поясів, під захистом магнітосфери Землі, через що ризик пошкодження клітин важкими іонами незначний, але він у багато разів зростатиме в тривалих польотах у далекому космосі. Тому першочергова увага приділяється саме визначенню радіаційного ризику компонентів сонячного вітру та засобів захисту, розробці досконалих методів дозиметрії в пілотованих космічних апаратах, радіаційних стандартів та ефективних протекторів для живих істот в пілотованих польотах щодо зниження радіаційного ризику. Досліджується комбінований вплив радіації та інших факторів космічного польоту, в першу чергу мікрогравітації, встановлюються реакції ДНК на дію важких іонів, діапазон пошкодження генетичного апарата та можливості репарації клітин *in situ* як основи для визначення чутливості клітин та тканин

до радіації при польотах в далекий космос та до Марса, дискутується потенціальна роль космічної радіації, особливо її важкого компонента, у формуванні та еволюції життя на Землі.

Планетарна біологія та пребіотичний синтез. З'ясовуються можливі хімічні шляхи походження життя — хімічна еволюція; ранні геологічні події (до кембрію) як такі, що мають відношення до походження та ранньої еволюції життя; фізико-хімічні та еволюційні аспекти відношення життя до планет. Приділяється увага вивченню наземних форм життя в незвичних та екстремальних умовах. Ведуться пошуки позаземних форм життя на інших планетах, включаючи інтелект, у Всесвіті, молекул біологічного значення у космосі, хімічних попередників життя, а також експериментальна перевірка концепції панспермії. Висвітлюються різні аспекти можливості життя на Марсі, пребіотично подібної органічної хімії Титана, який розглядається як планета-лабораторія для вивчення пребіотичних хімічних процесів, що відбуваються в умовах редукованої атмосфери, наявності рідин на поверхні та аерозолів в атмосфері, хімії вуглецю поза Землею тощо.

Природні та штучні екосистеми. Вивчаються механізми функціонування та динаміка екосистем, включаючи природні екосистеми на Землі та штучні екосистеми, які є необхідними для життєзабезпечення людини поза Землею, в космічних польотах та під час перебування на інших небесних тілах, зокрема Місяці та Марсі. Проводяться дистанційні спостереження за станом природних екосистем на Землі; розробляються теоретичні положення та засоби стабілізації та контролю штучних екосистем, технології їх окремих ланок для інтенсивного росту рослин, грибів та тварин, які плануються для харчування космонавтів, переробки одержаних продуктів для споживання та утилізації відходів в таких ізольованих екосистемах, тобто використовуються біотехнологічні принципи для здійснення біологічних перетворень в космічних польотах.

КОСМІЧНА БІОЛОГІЯ В УКРАЇНІ

В Україні космічна біологія бере початок в 1960-ті роки; саме в той період в Інституті мікробіології та вірусології Академії наук розробляється теоретична база наступних космічних біологічних експериментів з організмами, які повинні були знаходитись в активному фізіологічному стані під час польоту. Обґрунтовується положення, що саме такий підхід дасть змогу відповісти на найбільш жагучі питання, які стояли перед космічною біоло-

гією в часи, коли вже було зрозумілим, що в найближчому майбутньому космос стане сферою господарської та наукової діяльності людини. Потрібно було з'ясувати, як буде впливати на життєдіяльність організмів їх тривале перебування поза Землею, чи буде відбуватися адаптація до умов космічного польоту на протязі життя одного організму та на рівні поколінь, до чого це призведе. Як показали подальші роки, такий підхід повністю виправдав себе. Звичайно, дослідженням організмів, які росли і розвивалися в умовах космічного польоту, передувала напружена робота по удосконаленню методичних підходів та технічного обладнання космічних еспериментів. Були створені спеціальні культиватори: ІФС (інокуляційно-фіксуєча система), «Рост», «Світлоблок-1», «Біоконтейнер» та інші, фіксуєчі пристрої, розроблена відповідна система аналізів експериментального матеріалу. Паралельно з космічними експериментами в Інституті ботаніки ім. М. Г. Холодного з 1978 р. проводяться лабораторні роботи з моделювання дії окремих факторів польоту — вібрації та прискорення в режимі підйому космічного апарата (спільно з Інститутом загальної генетики РАН), змін напруженості електромагнітних полів (спільно з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень, м. Дубна та Фізико-технічним інститутом низьких температур НАН України), мікрогравітації (використовуються горизонтальні кліностати, які частково моделюють біологічні ефекти мікрогравітації, обумовлені відсутністю вектора гравітації, оскільки обертання організмів на кліностах не дає їм змоги сприймати гравітаційний стимул; проте обертання відбувається в гравітаційному полі); вплив важкого компонента космічної галактичної радіації імітували шляхом опромінення біологічних об'єктів потоками окремих важких іонів певної енергії на ядерних прискорювачах (спільно з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень, м. Дубна та Інститутом ядерних досліджень НАН України).

З 1974 р. експерименти з бактеріями, водоростями та вищими рослинами, культурами органів, тканин та клітин, запропоновані і підготовлені в наукових установах Національної академії наук України (Інститут молекулярної біології і генетики, Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного, Центральний ботанічний сад ім. М. М. Гришка, Дослідне виробництво Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця, Дослідно-конструкторське виробництво медико-біологічного приладобудування Інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р. Є. Кавецького), здійснювалися на біосупутниках «Космос-573, -654, -672, -1887», «Біон-9, -10, -11» (спільно з Інститутом медико-біологічних проблем, м. Москва), космічних кораблях «Союз-

12, -13, -16, -22» та орбітальних станціях «Салют» і «Мир» (спільно з НВО «Енергія», м. Москва) за національною та міжнародними програмами (радянсько-американська «Союз-Аполлон», радянсько-французька «Цитос», радянсько-чехословацька «Хлорела», радянсько-в'єтнамська «Азола»); з Європейським космічним агентством та Росією проведені експерименти «Протопласт» (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного), «Кістки» та «Тритон» (Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена НАН України), Росією та США — експеримент «Протонема» (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного, Інститут екології Карпат НАН України).

Наведемо хронологію польотних експериментів в галузі космічної біології.

1974—1978 рр. — серія експериментів з бактерією протей звичайний (*Proteus vulgaris*); досліджено швидкість росту, рухливість, хемотаксис, будову клітин і активність ферментів, проникність мембран тощо в різних умовах вирощування — аеробних, анаеробних та факультативно анаеробних.

1975—1992 рр. — серія експериментів з одноклітинною зеленою водоростю хлорела (*Chlorella vulgaris* — автотрофний штам ЛАРГ-1, *Ch. pyrenoidosa* — гетеротрофний штам g-1-11); досліджено швидкість росту, репродукцію, будову і функціональний стан клітин, вміст полісахаридів та активність ферментів гідролізу крохмалю, баланс кальцію та ураження бактеріями в різних режимах вирощування — на напіврідкому та твердому поживних середовищах в умовах освітлення та темноти, в трьохкомпонентній водній системі (водорості, риби, бактерії) тощо.

1980 р. — експеримент з протонеюмою моху фунарія вологомірна (*Funaria hydrometrica*); досліджено структурно-функціональну організацію зелених клітин протонеми, які здійснюють фотосинтез; експеримент з симбіотичною водною папороттю азола (*Azolla pinnata*); досліджено будову клітин папороті, азотфіксуєчої синьозеленої водорості анабена (*Anabaena azollae*) та асоціативних бактерій, а також взаємовідношення між еукаріотичними і прокаріотичними організмами.

1978—1991 рр. — серія експериментів з покритонасінними рослинами: горохом (*Pisum sativum*), твердою пшеницею (*Triticum durum*), резушкою (*Arabidopsis thaliana*), бальзаміном (*Impatiens balsamina*), огірками (*Cucumis sativus*), спіредолою (*Spirodela polyrrhiza*); досліджено ріст і розвиток паростків, структурно-функціональну організацію клітин вегетативних органів, особливості будови гравірецепторних клітин кореневого чохла, баланс кальцію, фізико-хімічні властивості цитоплазматичної мембрани, інтенсивність перекисного

окислення ліпідів тощо.

1981 р. — вперше в світі в космічному польоті зацвіли рослини резушки (однорічна рослина з коротким циклом розвитку, від насіння до насіння проходить до 40—45 діб), які були доставлені на орбіту у фазі двох сім'ядольних листків; досліджено будову їх генеративних органів.

1980—1983, 1989 рр. — серія експериментів з епіфітними та наземними орхідеями; досліджено ріст, розвиток, анатомічну будову листків, вміст фітогормонів та активність ферментів.

1987—1993 рр. — серія експериментів з культурами тканин гаплопапусу (*Haplorappus gracilis*) і гороху; досліджено ростові та ультраструктурні показники, інтенсивність перекисного окислення ліпідів тощо.

1989 р. — експерименти з культурами протопластів моркви (*Daucus sativa*) та рапса (*Brassica napus*); досліджено здатність протопластів регенерувати клітинну оболонку та утворювати мікрокалус в умовах космічного польоту, склад клітинної оболонки та структурно-функціональну організацію клітин мікрокалусів.

1989—1991 рр. — експерименти з культурою тканин резушки; досліджено здатність до морфогенезу в калусній культурі в умовах космічного польоту та особливості диференціювання гравірецепторного апарата коренів, які утворилися *de novo* в умовах мікрогравітації.

1991 р. — експеримент з культурою органів картоплі (*Solanum tuberosum*); досліджено здатність до утворення мінібульб та ультраструктуру запасуючої крохмаленосної паренхіми.

1989—1992 рр. — експерименти зі щурами, тритонами та культурою остеобластів мишей; досліджено ультраструктуру елементів кісткової тканини та вміст кальцію.

1996 р. — експеримент з протонеюмою мохів потія проміжна (*Pottia intermedia*) та цератодон пурпурний (*Ceratodon purpureus*); досліджено просторову орієнтацію гравічутливої протонеми в умовах мікрогравітації та структурно-функціональну організацію апікальної клітини, яка є одночасно місцем сприйняття гравітаційного стимулу та здійснення гравітропічної реакції; отримано біопсійний матеріал з кісток мавп та кінцівок тритонів після закінчення експериментів з цими тваринами для досліджень закономірностей остеогенезу в умовах мікрогравітації.

Протягом 1980—1991 рр. колективами кафедри мікробіології Кримського медичного інституту та Кримського центру біомедичних проблем підготовлено і проведено (спільно з НВО «Енергія») понад 50 експериментів на борту орбітальних станцій «Салют» та «Мир». В основу експериментів

було покладено концепцію щодо позитивної дії мікрогравітації на електрофоретичний процес та кристалоутворення, оскільки в умовах мікрогравітації не відбувається седиментації розділених матеріалів через відсутність конвекції (теплової та концентраційної), яка руйнує картину електрофоретичного розділення. Робота велася в трьох напрямках: 1) електрофоретичне розділення гетерогенних біологічних систем з метою одержання високоочищених генноінженерних препаратів — інтерферон, інсулін, вірусні білки та ін., а також виділення штамів мікроорганізмів — суперпродуцентів важливих лікарських препаратів — антибіотики, ферменти та ін. Для реалізації цих завдань було створено електрофоретичні установки першого покоління «Таврія», «Світлана» та «Робот», другого покоління — «Ручей», третього — «Поток»; 2) кристалізація модельних білків — лізоцин, нейрамінідаза вірусу грипу та люцифераза на установці «Біокрист» та 3) культивування мікробних та соматичних клітин-продуцентів біологічно активних речовин в спеціально створеному для цієї мети біореакторі.

Серію експериментів з розділення фракцій клітин та очистки біологічно активних речовин за допомогою методів зонального електрофорезу та ізофокусування виконано в автоматичному режимі на установці «Каштан» (виготовлена на Дослідно-конструкторському виробництві медико-біологічного приладобудування Інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України за замовленням Конструкторського бюро загального машинобудування, м. Москва) на супутниках серії «Космос» та «Фотон».

НВО «Респіратор» створено ряд комплексів регенерації атмосфери біосупутників, які пройшли успішну експлуатацію від «Біон-1» до «Біон-11». Для відокремлення впливу мікрогравітації від інших факторів космічного польоту була розроблена та введена в дію установка синхронного експерименту на базі Інституту медико-біологічних проблем (м. Москва). З метою підвищення достовірності наукової інформації, яка одержувалася в космічних експериментах, були створені самохідні пересувні лабораторні установки для проведення первинної обробки експериментального матеріалу безпосередньо на місці приземлення біосупутників.

Як показує аналіз стану та напрямків досліджень в галузі світової космічної біології, Україна стала одним з основних центрів проведення комплексних досліджень біології клітини в умовах космічного польоту на сучасному науково-методичному рівні. Українським вченим належить пріоритет у відкритті гравічутливості рослинної клітини та вста-

новленні загальних закономірностей біологічних ефектів постійно діючого фактора космічного польоту — мікрогравітації на клітинному та організмовому рівнях.

В результаті різнопланового вивчення рослинних об'єктів з використанням сучасних цитологічних, біохімічних та біофізичних методів в космічному польоті та при моделюванні окремих фізичних факторів польоту в лабораторії була встановлена залежність діапазону та характеру змін, які відбуваються на клітинному та молекулярному рівнях при дії цих факторів, від природи та тривалості діючого фактора, ступеня складності та фізіологічного стану об'єкта. Показано, що зміни в структурно-функціональній організації клітин при дії вібрації та прискорення в режимі підйому космічного апарата є тимчасовими і після усунення діючого фактора клітинна організація швидко повертається до норми. Ростові показники проростків під впливом електромагнітних полів різної напруженості, в тому числі зниженої у порівнянні з магнітним полем Землі, через 7—10 діб вирівнювалися до таких в стандартних умовах вирощування. Виявлені біологічні ефекти електромагнітних полів, різних за напруженістю, свідчать, з одного боку, про тісний зв'язок ряду метаболічних процесів в рослинній клітині з природним рівнем геомагнітного поля, з другого, — що цей зв'язок не є занадто жорстким. В умовах природних флуктуацій геомагнітного поля у організмів виробився спадково закріплений гнучкий механізм їх сприйняття. Наслідки опромінення важкими іонами виявляються на клітинному рівні у появі мікроядер та хромосом зі зміненою морфологією. Найширший спектр змін структурно-функціональної організації клітин зареєстрований в умовах космічного польоту та частково подібний до такого при дії кліностагування; причому було встановлено, що вплив мікрогравітації та кліностагування посилюється зі збільшенням тривалості їх дії та його прояви ускладнюються у багатоклітинних організмів у порівнянні з одноклітинними.

Перші дані щодо істотного впливу мікрогравітації на бактеріальні та рослинні клітини були одержані в космічних експериментах з бактерією протей звичайний та одноклітинною зеленою водоростю хлорела. Показники росту культур бактерій та водоростей при різних режимах вирощування в умовах космічного польоту у порівнянні з наземними контролями дозволили сформулювати загальні закономірності поведінки одноклітинних організмів в орбітальному польоті, а саме: 1) на протязі певного часу ріст, розвиток та інтенсивність обміну речовин відбувається в межах адаптаційної відповіді живого та 2) умови польоту посилюють

тенденцію, закладену в момент організації експерименту — в культивативних камерах при оптимальних умовах ріст мікроорганізмів в орбітальному польоті прискорюється у порівнянні з наземним контролем, при несприятливих уповільнюється сильніше, ніж в лабораторії (Влияние космического полета на развивающиеся организмы, 1978; Сытник и др., 1983). Встановлені закономірності мають також конкретне прикладне значення, допомагаючи в розрахунках при створенні контрольованих екологічних систем життєзабезпечення в космічних апаратах, оскільки однією з їх основних ланок є мікроорганізми, які беруть участь у здійсненні кругообігу речовин в таких системах.

В цих експериментах для аналізу клітин бактерій та водоростей вперше в світовій космічній біології українськими вченими був застосований електронно-мікроскопічний метод, який дає змогу вивчати будову клітин, збільшених у десятки тисяч разів, і тим самим наблизитися до оцінки функціонального стану клітинних органел і, отже, побічно судити про інтенсивність та спрямованість клітинного метаболізму. Тому тонка структура клітини та її зміни під дією факторів космічного польоту виявилися одними з надійних індикаторів для оцінки ступеня впливу факторів космічного польоту на функціонування клітин організмів, які знаходилися в активному фізіологічному стані під час польоту.

Експерименти, виконані з вищими рослинами, які росли і розвивалися в умовах космічного польоту певний час, однозначно показали збереження та реалізацію генетичної інформації в процесах морфогенезу вегетативних та генеративних органів. В короткочасних експериментах до 8 діб, адекватних завданням вивчення спеціалізованих гравірецепторних клітин у багатоклітинних форм, одержана достатньо повна інформація щодо диференціювання та структурно-функціональної організації клітин кореневого чохла — гравірецепторного апарата кореня — у відсутності гравітації. Виявлені закономірності гістогенезу та диференціювання клітин різних шарів кореневого чохла свідчать про те, що в умовах мікрогравітації гравірецепторний апарат інтактних зародкових коренів формується, але не функціонує у відсутності гравітаційного вектора (ініціалі чохла генетично детерміновані в насінні), зберігаючи певний час здатність до його сприйняття. Показано, що гравічутлива протонема мохів в умовах мікрогравітації в темноті, на відміну від наземного контролю, утворює спірально-видну пластинку, нитки якої переважно закручуються праворуч по відношенню до напрямку росту в гравітаційному полі. Одночасно встановлено, що неможливість здійснення гравітропічної реакції в умовах мікрогравітації компенсується фототропіз-

мом, тобто спрямоване світло забезпечує в цих умовах досить нормальне просторове розташування органів рослин. Висунуте положення є одним з базових у створенні технологій космічного рослинництва та відкриває нові можливості для вивчення механізмів окремих тропічних реакцій рослин, зокрема ролі фітохрому у фототропізмі, у чистому вигляді, тобто при відсутності гравітації. На підставі даних космічних експериментів щодо ризогенезу *de novo* в калусній культурі резушки в умовах мікрогравітації припускається, що клітини апікальної меристеми кореня є гравічутливими (Кордюм и др., 1994).

Експерименти з шапінковими грибами в умовах космічного польоту та на кліностах виявили різний ступінь залежності від гравітації процесів координації морфогенетичних перебудов в онтогенезі грибів та просторової орієнтації їх спороносних органів — гіменофорів у відносно просто організованих видів та більш розвинених. У перших випадіння однієї стадії морфогенезу не призводить до повної зупинки наступного спорогенезу; у других затримка розвитку на будь-якій стадії блокує наступний морфогенез, та спори на плодовому тілі не утворюються. Ці дані свідчать про більш жорстку детермінацію морфогенезу плодових тіл гравітаційним фактором у високоорганізованих груп грибів (Горової и др., 1991).

Значний внесок зроблений українськими вченими в дослідження впливу мікрогравітації на формування органів насінневого та вегетативного розмноження рослин в умовах космічного польоту. Детальне вивчення генеративного розвитку рослин резушки (починаючи зі стадії закладання пуп'янків), які росли на орбіті протягом 28 та 65 діб, показало, що формування частин квітки проходило нормально; проте на різних стадіях розвитку андроцею та гінецею відбувалися процеси, що призводили до стерилізації їх елементів та відсутності утворення життєздатного насіння. Дегенерація елементів гінецея мала місце на стадіях тетрад макроспор, одно- двох-, чотирьохядерного та сформованого зародкового мішка; причому перші ознаки зупинки в розвитку спостерігалися, як правило, в соматичних клітинах насінневого зачатку. У чоловічій генеративній сфері переважала тенденція до нормального ділення та диференціювання клітин спорофіту та аномального розвитку гаметофіту (пилкового зерна). На підставі особливостей стерилізації генеративних органів вищих рослин в умовах мікрогравітації припускається, що цей процес може бути обумовлений порушеннями гормональної регуляції цвітіння та плодоношення. Прискорений розвиток чоловічого гаметофіту в умовах мікрогравітації описаний у гадючої цибульки, ци-

булини якої були доставлені на орбіту з зачатками суцвіть на стадії археспоріальних клітин (Kordyum et al., 1979, 1983). В серії експериментів з наземними та епіфітними видами орхідних, які доставлялися на орбіту у квітучому стані, було виявлено значне скорочення тривалості цвітіння у порівнянні з наземним контролем, хоча вегетація рослин продовжувалася. Показана можливість використання орхідей, особливо епіфітів, як елемент ди-зайну кабіни космічного літального апарата (Червченко и др., 1986).

Експериментальні дані щодо генеративного розвитку рослин в умовах мікрогравітації залишають відкритим питання про можливість одержання життєздатного насіння в орбітальному польоті та наступних поколінь рослин.

На відміну від невирішених питань щодо насінневого розмноження рослин в умовах мікрогравітації, в тому числі ряду сільськогосподарських культур, рекомендованих для використання в системах життєзабезпечення на космічних апаратах, українськими вченими вперше доведена можливість формування органів вегетативного розмноження рослин в умовах мікрогравітації на прикладі культури органів картоплі. Мінібульби, які утворилися в космічному польоті, не відрізнялися від контрольних за розмірами, кольором шкуринки та містили добре розвинену запасуючу крохмаленосну паренхіму (Кордюм и др., 1995). Показано функціонування в умовах мікрогравітації і органів вегетативного розмноження спіроделі, хоча мала місце помітна затримка в утворенні наступних поколінь (Кутлахмедов и др., 1978).

В серії космічних та кліностатних експериментів продемонстрований широкий спектр перебудов ультраструктури різних типів клітин, не спеціалізованих до сприйняття гравітаційного вектора, у багатоклітинних форм та одноклітинних, які живуть вільно, їх біохімічних та фізіологічних параметрів, що відображає зміни рівня та спрямованості метаболізму рослинних організмів (Сытник и др., 1984; Кордюм и др., 1994; Nedukha, 1996). Характер цих перебудов при відсутності аномалій в процесах цитокінезу та диференціювання клітин. Гісто- та органогенезу свідчить про те, що зміни метаболізму під впливом мікрогравітації відбуваються в діапазоні фізіологічної відповіді в рамках генетичної детермінованості онтогенезу. Одним з найцікавіших ефектів зміненої гравітації на клітинному рівні є зміна кальцієвого балансу, що проявляється у збільшенні внутрішньоклітинної концентрації іонів кальцію в умовах мікрогравітації та кліностатування. З використанням блокторів кальцієвих каналів та інгібітора кальцієвої помпи була показана гетерогенна локалізація каль-

цієвих каналів та молекул АТФази в цитоплазматичній мембрані рослинних клітин з верхівковим ростом. На основі експериментальних даних припускається, що збільшення концентрації іонів кальцію при дії зміненої гравітації може обумовлюватися пригніченням активності кальцієвої помпи цитоплазматичної мембрани. Встановлені зміни вмісту кальцію в тваринних клітинах в умовах мікрогравітації, зокрема в процесі регенерації кінцівок тритона, стимульованою передпольотною їх ампутацією, у порівнянні з наземним контролем, а також порушення кальцієвого гомеостазу в хондроцитах миші *in vitro*, що поряд з відміченими перебудовами ультраструктури різних елементів кістки вказують на істотний вплив цього фактора на процес остеогенезу. Наведені дані свідчать про те, що змінена гравітація належить до таких зовнішніх факторів, дія яких безпосередньо пов'язана з функціонуванням внутрішньоклітинної системи передачі сигналів з участю іонів кальцію. Це положення відкриває нові перспективи в подальших дослідженнях дії гравітації на клітинний метаболізм (Kordyum and Danevich, 1995). Встановлені зміни мікрів'язкості, кількісного складу жирних кислот та інтенсивності перекисного окислення ліпідів цитоплазматичної мембрани в умовах мікрогравітації та кліностатування підводять фактичну основу під припущення, які висловлювалися раніше у загальному вигляді щодо можливих змін в умовах мікрогравітації проникності клітинних мембран, в першу чергу цитоплазматичної. В світлі цих уявлень стають зрозумілими факти перебудов метаболізму та ультраструктури клітин при нормальному в цілому морфогенезі, а також ускладнення впливу мікрогравітації на багатоклітинні організми через наявність міжклітинних взаємодій в системах тканин.

На основі аналізу структурно-функціональних змін органел меристематичних клітин, клітин, які ростуть розтяганням, та диференційованих в умовах мікрогравітації та кліностатування встановлені певні закономірності в їх прояві, а саме:

- 1) гетерогенність органел в клітинній популяції у відношенні до ступеня перебудов (відображає відмінності в стадіях біогенезу та функціональному навантаженні органел,
- 2) сумісність просторової послідовності у розвитку в процесах клітинного росту та диференціювання,
- 3) підвищення реактивності при зміні функціонального навантаження та
- 4) збільшення активності при втраті клітиною специфічних функцій (заміщення функцій).

Сформульовані закономірності прояву структурно-функціональних змін органел в процесах росту,

диференціювання та життєдіяльності клітин незалежно від їх видової та тканинної належності при дії зміненої гравітації мають загальний характер, проте в той же час можуть нести інформацію щодо дис-, гіпер- або гіпофункції окремих типів клітин, тканин та органів в цілому. Істотні перебудови ультраструктури клітинних органел в умовах зміненої гравітації відображають зміни у функціональному навантаженні органел, що корелює зі змінами метаболізму. Показано, що зміни метаболізму клітин в умовах мікрогравітації ведуть до прискорення 1) росту та диференціювання меристематичних клітин та клітин, що ростуть розтяганням, та 2) старіння диференційованих клітин, і отже, до скорочення діяльності меристем та в ряді випадків — онтогенезу організмів (Kordyum, 1997).

Обґрунтовано положення про клітинні механізми адаптації до зміненої гравітації, яка здійснюється, як показує комплексність (багатокомпонентність) подій, за принципом саморегульованих систем; проте підтримання ряду найважливіших показників клітинного гомеостазу в межах норми відбувається на фоні прискорення старіння. Хоча мікрогравітація є штучним фактором, що не брав участі в життєдіяльності живих систем, її хронічна дія в певних часових діапазонах не перешкоджає розвитку адаптивних реакцій на клітинному та організмовому рівнях. Стратегічне значення в первинній адаптації клітин до дії цього фактора мають підтримання текучості ліпідного бішару цитоплазматичної мембрани в певних межах та активація анти-оксидантних систем (мікрів'язкісний та окислювальний гомеостаз). Тривала (вторинна) адаптація клітин до умов мікрогравітації забезпечується перебудовами клітинного метаболізму, зокрема його інтенсифікацією, в основі яких лежать зміни функціонального навантаження клітинних органел та активності ферментів:

ПЕРВИННА АДАПТАЦІЯ	ВТОРИННА АДАПТАЦІЯ
Підтримання текучості ліпідного бішару цитоплазматичної мембрани	Інтенсифікація клітинного метаболізму
Збільшення вмісту ненасичених жирних кислот	Підвищення функціонального навантаження клітинних органел
Активация анти-оксидантних систем	Зміни активності ферментів

Нарешті, слід відмітити розроблені уявлення щодо можливих змін взаємовідношень еукаріотичних та прокаріотичних організмів в умовах мікрогравітації, які базуються на даних, одержаних в кос-

мічних експериментах, а саме: збільшення кількості конкомітантних бактерій в симбіотичній системі водна папороть азола — синьозелена водорість анабена у порівнянні з контролем, значне зростання кількості клітин хлорели, інфікованих бактеріями роду *Pseudomonas* при культивуванні в трьохкомпонентній водній системі в орбітальному польоті. Припускається, що останні спостереження можуть бути пов'язані з підвищенням патогенності бактерій та/або зниженням імунітету рослин.

Підтверджені теоретичні уявлення щодо сприятливого впливу мікрогравітації на біотехнологічні процеси, дозволили вирішити ряд практичних завдань щодо удосконалення бортової апаратури, підбору біологічних об'єктів, розробки буферних, поживних та консервуючих середовищ, засобів реєстрації та передачі одержаної інформації. Було виділено високоочищені препарати — гемаглютиніни вірусу грипу та альфа-2-інтерферон, які використовувалися в наукових дослідженнях; отримано великі кристали нейрамідіази та люциферази, що придатні для рентген-структурного аналізу; відпрацьовано оптимальні умови культивування штамів-продуцентів біологічно активних речовин та проведення різних видів електрофорезу (зональний, ізоелектричне фокусування, ізотахофорез та електрофорез у вільному потоці). Було розроблено також оперативні програми математичної обробки експериментальних даних та автоматичного керування апаратурою (Кривошеин и др., 1989).

Показана можливість одержання за допомогою цих методів в умовах мікрогравітації очищених препаратів гормону альфа-1-тимозин, рекомбінантного альфа-3-інтерферону, епідермального фактора росту, поліаміноксидази та фракцій дріжджових клітин (Бабский и др., 1989).

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОСМІЧНОЇ БІОЛОГІЇ В УКРАЇНІ

Переходячи до розгляду перспективних напрямків подальшого розвитку космічної біології в Україні, перш за все треба зазначити, що відкриття гравічутливості клітини поставило перед космічною біологією три нагальних взаємозв'язаних питання, а саме: 1) як різного типу клітини сприймають гравітацію, 2) які механізми дії мікрогравітації на клітини та 3) які можливості і механізми адаптації клітин до мікрогравітації, що викликає зміни у таких фізичних параметрах як седиментація, конвекція, капілярність, гідростатичний тиск та поверхневий натяг.

Вирішення цих питань, на нашу думку, неможливе без з'ясування первинних подій, що лежать в

основі метаболічних змін, визначення шляхів передачі первинних сигналів зміни гравітації та їх трансформації у фізіологічні реакції-відповіді клітин, пізнання рівнів регуляції змін метаболізму (реплікація, транскрипція, пост-транскрипційні процеси, трансляція, пост-трансляційна модифікація та алостеричні процеси), виявлення фаз клітинного циклу, найбільш чутливих до змін метаболізму в умовах мікрогравітації, адаптаційних можливостей фотосинтезу до цих умов, характеру взаємодії між еукаріотичними та патогенними прокаріотичними організмами тощо. На підставі експериментальних даних висунута гіпотеза, що саме цитоплазматична мембрана є первинним місцем дії мікрогравітації; зміни її фізико-хімічних властивостей, в першу чергу, ліпідного бішару може призводити до змін проникності мембрани, іонного та водного транспорту, функціонування мембранних рецепторів, активності мембранозв'язаних ферментів тощо, які реалізуються в інтегральні клітинні процеси; наслідки змін останніх реєструються за допомогою електронно-мікроскопічних, фізіологічних, біохімічних, біофізичних, молекулярно-біологічних та інших методів. Метаболічні перебудови проявляються по-різному в реалізації основних клітинних функцій у одноклітинних організмів, в системі тканин та органів багатоклітинних форм та в культурі клітин *in vitro*, позбавлених організмових кореляцій, що дійсно підтверджується різноманітними та в ряду випадків суперечливими результатами феноменологічних досліджень різних біологічних об'єктів в численних космічних та кліностатних експериментах.

На підставі встановлених закономірностей та висунутих теоретичних положень визначено основні питання, вирішення яких спрямоване в перспективі на 1) пізнання клітинних, субклітинних та молекулярних механізмів біологічної дії мікрогравітації та гравічутливості клітини, а також розробки космічних клітинних біотехнологій, які базуються на змінах клітинного метаболізму в умовах мікрогравітації, та 2) розробку концепцій щодо росту, розвитку та стійкості автотрофних організмів в цих умовах з метою одержання другого та наступного покоління вищих рослин в космічному польоті та створення засобів космічного рослинництва. З концепції, що мікрогравітація суттєво впливає на метаболізм клітин незалежно від їх видової та тканинної належності, виходить фундаментальне положення, що є базовим для сучасної космічної біології, — клітини, які діляться або знаходяться в активному метаболічному стані, є найбільш чутливими до впливу зміненої сили тяжіння.

З 1993 р. фундаментальні та прикладні розробки з космічної біології в Україні є складовою частиною

Державної космічної програми України, фінансуються Національним космічним агентством України та виконуються інститутами Національної академії наук України, Академії медичних наук України, університетами та іншими установами. Перспективними напрямками цих розробок визначені такі, в яких здобутки українських вчених одержали світове визнання та розвиток яких забезпечений достатнім наявним науково-технічним потенціалом.

- **Фундаментальні напрямки:**

- Біологія клітини в умовах мікрогравітації; з'ясування клітинних та молекулярних механізмів гравічутливості живих істот.
- Дослідження ролі кальцію в біологічних ефектах мікрогравітації; виявлення клітинних процесів, що є гравітаційно- та кальцій-залежними.
- Біологія розвитку в умовах мікрогравітації; створення концепцій щодо росту, розвитку та розмноження рослинних і тваринних організмів під впливом зміненої гравітації.
- Вивчення процесу старіння, його темпів та особливостей в умовах зміненої гравітації.
- Дослідження взаємовідносин прокаріотичних (патогенних, асоціативних та симбіотичних) та еукаріотичних організмів в умовах мікрогравітації; оцінка патогенності бактерій та вірусів в цих умовах.

- **Прикладні напрямки:**

- Розробка космічних клітинних біотехнологій та удосконалення технологій електрофорування в умовах мікрогравітації для одержання препаратів біологічно активних речовин та гомогенних клітинних популяцій для медицини, фармацевтичної промисловості та сільськогосподарства.
- Створення засобів космічного рослинництва та утилізації відходів для використання в контрольованих екологічних системах життєзабезпечення людини в тривалих космічних польотах.
- Використання експрес-методів оцінки стану організмів в умовах космічного польоту в проведенні екологічного та радіобіологічного моніторингу стану біосфери.

- Удосконалення існуючого та створення нового покоління космічного обладнання для проведення космічних біологічних та біотехнологічних експериментів.

- Розробка програм біологічних та біотехнологічних експериментів для біосупутників типу «Біон», кораблів багаторазового використання «Шаттл» та міжнародної орбітальної станції «Альфа».

У виконанні цих робіт беруть участь 14 інс-

титутів Національної академії наук України: ботаніки ім. М. Г. Холодного (головна установа), біохімії ім. О. В. Палладіна, біоорганічної хімії та нафтохімії, гідробіології, екології Карпат, зоології ім. І. І. Шмальгаузена, клітинної біології та генетичної інженерії, мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного, молекулярної біології та генетики, фізіології рослин та генетики, фізики, фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна, хімії поверхні, Центральний ботанічний сад ім. М. М. Гришка, Інститут геронтології АМН України, Кримський центр біомедичних проблем, Український науково-дослідний інститут онкології та радіології МОЗ України, Київський університет ім. Тараса Шевченка, Дослідно-конструкторське виробництво медико-біологічного приладобудування інституту експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р. Є. Кавецького та НВО «Респіратор».

Існуюча в Україні програма космічних біологічних та біотехнологічних експериментів відкрита для міжнародного співробітництва з США, Німеччиною, Францією, Данією, Японією та іншими космічними державами. Важливою подією в цьому відношенні стало підписання угоди між США та Україною щодо проведення спільного біологічного експерименту за участю українського космонавта під час 87-ї експедиції на космічному кораблі «Колумбія» в листопаді 1997 р. Експеримент передбачає комплексні дослідження на молекулярному, клітинному та організмовому рівнях росту і розвитку вищих рослин в умовах мікрогравітації. В експерименті беруть участь: з боку України — 6 інститутів Національної академії наук України: ботаніки ім. М. Г. Холодного (головна установа), екології Карпат, мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного, молекулярної біології та генетики, фізіології рослин та генетики, Центральний ботанічний сад; з боку США — 5 університетів (Канзаський, Луїзіанський, Огайський, Північної Кароліни, Вісконсинський), Космічний центр ім. Дж. Кеннеді, фірми «Байонетикс» та «Дайнемік». Основні завдання експерименту полягають у вивченні в умовах мікрогравітації: 1) процесів запилення, запліднення та формування насіння, 2) структури та функціонування фотосинтетичного апарату, 3) структури, проліферації та диференціювання клітин різних ростових зон кореня, 4) складу та вмісту фітогормонів, амінокислот та ліпідів, 5) генної експресії, 6) просторового розташування вищих рослин та ролі фітохрому в тропічних реакціях, 7) процесу патогенезу при ураженні вищих рослин грибами та бактеріями.

Спостереження за рослинами на орбіті та всі маніпуляції щодо запилення рослин та фіксації

матеріалу виконуватимуться українським космонавтом за протоколом експерименту. Проведенню експерименту в орбітальному польоті передують напружена робота на Землі щодо відпрацювання методів вирощування рослин та обробки експериментального матеріалу, його вивчення в стаціонарних умовах, узгодження спільних дій українських та американських вчених, постійного обміну поточною інформацією тощо (перша робоча нарада за участю українських вчених відбулася в Космічному центрі ім. Дж. Кеннеді в жовтні 1995 р., друга — в Києві в березні 1996 р., два перевірочних експерименти — в жовтні 1996 р. та квітні—травні 1997 р., останній проходив з участю українських космонавтів).

До завдань спільного українсько-американського експерименту входить також «Освітня програма», згідно з якою школяри США та України беруть участь в розділі щодо вивчення процесів запилення, запліднення та формування насіння в умовах мікрогравітації, одночасно з космонавтом провадитимуть запилення рослин, досліджуватимуть їх подальший розвиток та порівнюватимуть одержані результати на Землі і в космічному експерименті. За планом підготовки до здійснення освітньої програми з ініціативи Національного космічного агентства України, Малої академії наук, Українського державного еколого-натуралістичного центру, Національної академії наук України, Міністерства освіти та участю українських та американських вчених проводяться семінари для вчителів шкіл з усіх областей України, школярі яких братимуть участь в експерименті; відпрацьовується налагодження телезв'язку між Україною та США для прийняття інформації з борту «Колумбії» під час експерименту та проведення телесеансів з українським космонавтом. Виконання цієї та інших подібних міжнародних програм сприятиме популяризації космічних наук та ширшому залученню молоді до досліджень в галузі космічної біології, яка є невід'ємною частиною вивчення та освоєння космічного простору, наукової та господарської діяльності людства в третьому тисячолітті.

- Бабский В. Г., Жуков М. Ю., Сазонов В. И., Стоянов А. В. Теоретический анализ процесса изоэлектрофокусирования белков на установке «Каштан» // Косм. наука и техника.—1989.—Вып. 4.—С. 15—19.
- Влияние космического полета на развивающиеся организмы. — Киев: Наук. думка, 1978.—158 с.
- Газенко О. Г., Ильин Е. А., Парфенов Г. П. Космическая биология (Некоторые итоги и перспективы) // Изв. АН СССР. Сер.биол.—1974.—№ 4.—С. 461—475.
- Горовой Л. Ф., Касаткина Т. Б., Попова А. Ф., Кордюм Е. Л. Шляпочные грибы и водоросли — объекты космической биологии // Проблемы косм. биол.—1991.—69.—С. 1—230.
- Дубинин Н. П., Ваулина Э. Н. Эволюция и гравитация // Проблемы косм. биол.—1976.—33.—С. 7—17.

- Кордюм Е. Л., Бараненко В. В., Недуха Е. М., Самойлов В. М. Формирование миниклубней у *Solanum tuberosum* в условиях микрогравитации // Бот. журн.—1995.—80.—№ 6.—С. 74—80.
- Кордюм Е. Л., Сытник К. М., Белявская Н. А. и др. Современные проблемы космической клеточной фитобиологии // Проблемы косм. биол.—1994.—73.—С. 1—293.
- Космонавтика СССР. — М: Машиностроение, 1987.—496 с.
- Кривошеин Ю. С., Криворутченко Ю. Л., Крашенюк А. В. и др. Электрофоретическое разделение и очистка биологических объектов в условиях микрогравитации // Косм. наука и техника.—1989.—Вып. 4.—С. 5—10.
- Кутлахмедов Ю. В., Сокирко Г. С., Гродзинский Д. М. и др. Изучение влияния факторов космического полета на выход из анабиотического состояния турбионов спироделы многоклеточной // Косм. исслед. на Украине.—1978.—Вып. 12.—С. 49—54.
- Сытник К. М., Кордюм В. А., Кордюм Е. Л. и др. Микроорганизмы в космическом полете. — Киев: Наук. думка, 1983.—156 с.
- Сытник К. М., Кордюм Е. Л., Недуха Е. М. и др. Растительная клетка при изменении геофизических факторов. — Киев: Наук. думка, 1984.—135 с.
- Физиологические проблемы невесомости. — М: Наука, 1990.—288 с.
- Черевченко Т. М., Майко Т. К., Богатырь В. Б. и др. Перспективы использования тропических орхидей для космических исследований // Косм. биол. и биотехн. — Киев: Наук. думка, 1986.—С. 41—54.
- Claasen D. E., Spooner B. S. Impact of altered gravity on aspects of cell biology // Int. Rev. Cytol.—1992.—156.—С. 301—373.
- Cogoli A., Bechler B., Lorenzi G. Response of cells to microgravity // Fundamentals of space biology. — Berlin: Springer-Verlag, 1990.—P. 97—111.
- Halstead T. W., Dutcher F. R. Status and prospects // Ann.Bot.—1984.—54.—Suppl. 3.—P. 3—18.
- Halstead T. W., Dutcher F. R. Plants in space // Annu. Rev. Plant Physiol.—1987.—38.—P. 317—345.
- Kordyum E. L. Plant cells in microgravity and under clinostating // Int. Rev. Cytol.—1997.—171.—P. 1—78.
- Kordyum E. L., Danevich L. A. Calcium balance changes in tip-growing plant cells under clinorotation // J. Gravit. Physiol.—1995.—2.—P. 147—148.
- Kordyum E. L., Popova A. F., Mashinsky A. L. Influence of orbital flight conditions on formation of genitals in *Muscari racemosum* and *Anethum graveolens* // Life Sci. Space Res.—1979.—17, N 3.—P. 301—304.
- Kordyum E. L., Sytnik K. M., Chernyaeva I. I. Peculiarities of genital organ formation in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. under space flight conditions // Adv. Space Res.—1983.—3, N 9.—P. 247—250.
- Nedukha E. M. Effects of microgravity on the structure and function of plant cell walls // Int. Rev. Cytol.—1996.—170.—P. 39—77.
- Sievers A., Hensel W. Root cap: Structure and function // Plant Root: The Hidden Half. — New York: Dekker, 1991.—P. 53—74.

SPACE BIOLOGY: CURRENT STATUS IN THE WORLD AND IN UKRAINE

E. L. Kordyum

The main directions of research in the field of space biology in the World and its status and prospects in Ukraine are considered. The tasks of space biology in the State Space Programme of Ukraine and international co-operation in this field are presented.

УДК 616.45-001.1/3:612.67/68:531.5

Влияние гипергравитационного стресса на интенсивности газообмена, биосинтеза РНК и белка, терморегуляцию и выживаемость у животных разных видов

В. В. Фролькис, Х. К. Мурадян, А. Н. Тимченко, Т. Г. Мозжухина

Інститут геронтології АМН України, Київ

Надійшла до редакції 07.03.97

Вивчено вплив гіпергравітаційного стресу на виживання, газообмін, терморегуляцію та біосинтез РНК і білка у дорослих самців дрозофіл, мишей і щурів. Показано, що дрозофіли набагато переважали мишей і щурів за толерантністю до гіпергравітації. Вони повністю виживали при 5000g та приблизно на четвертину після 3-год сеансу при 20000g. У мишей та щурів при 10-хв експозиції LD50 складала 55—60g і 25g відповідно. В діапазоні помірних і сублетальних гіпергравітаційних навантажень інтенсивність газообміну у мишей і щурів збільшувалась, але прогресивно зменшувалась із збільшенням гіпергравітації в області летальних навантажень. В цій області суттєво зменшувались також температура тіла та інтенсивність синтезу тотальної РНК і білка в міокарді, лобній корі та гіпоталамусі. В мозочку, навпаки, інтенсивність біосинтетичних процесів збільшувалась. В постстресовий відновний період інтенсивність газообміну і температура тіла повертались до початкового рівня приблизно через 1—2 год.

Известно, что частотно-амплитудные характеристики большинства физических факторов — электрических и магнитных полей, световой и ионизирующей радиации, звука и вибрации — могут быть в той или иной степени модулированы, а их отрицательное влияние на биологические объекты может быть ослаблено с помощью различных экранирующих и защитных приспособлений. Гравитация же является неотъемлемым свойством любой материальной частицы и потому гравитационные поля «вездесущи и неуправляемы». По-видимому, этим же можно объяснить, почему гравитационные воздействия выделяются на фоне других факторов космического полета по степени и разнообразию оказываемых отрицательных эффектов на биологические объекты (Malacinski, Neff, 1984; Lee et al.,

1985; Le Bourg, Lints, 1989; Nicogossian et al., 1989; Miquel, Souza, 1991; Lints et al., 1993; Frolikis et al., 1995).

На видовые отличия влияния гравитационных факторов, по-видимому, первым обратил внимание Галилей, который еще в 1638 г. опубликовал работу «Трактат и математическая демонстрация в двух новых науках», в которой указывал, что относительная масса опорно-двигательного аппарата должна увеличиваться по мере увеличения размеров животного в большей степени, чем масса тела. Он обратил внимание на то, что такая зависимость, очевидно, справедлива только для наземных животных, но не для водоплавающих видов, находящихся, по существу, в условиях гипогравитации (Galileo, 1638). Более современные разработ-

ки в этой области убеждают, что должен существовать как верхний предел массы тела наземных животных (по различным оценкам до 20000 кг), так и предел их способности переносить краткосрочные или хронические состояния гипергравитации (ГГ) (Economos, 1979; Pace, Smith, 1981). Интересно, что в условиях невесомости скорость роста клеток микроорганизмов или разных видов одноклеточных может увеличиваться в несколько раз, тогда как рост клеток многоклеточных видов при этом подавляется. На борту КА «Скайлэб» скорость роста клеток WI-38 из легких человека также заметно уменьшалась, что сопровождалось параллельным снижением потребления глюкозы (Hughes-Fulford, 1991). Однако следует отметить, что в большинстве случаев такие исследования и публикации носят спорадический и несистематизированный характер и до настоящего времени не существует сколь-нибудь общепринятой концепции ни о видовых отличиях толерантности к гравитации, ни о возможных ее детерминантах и путях модификации. Между тем эти вопросы являются необходимыми элементами фундамента космической биологии. Более того, их выяснение имеет не только познавательное значение, но могло способствовать решению целого ряда прикладных задач, в частности при поиске гравипротекторов — средств, которые позволяют повысить толерантность к ГГ и снизить возможные отрицательные последствия ГГ или невесомости.

Цель настоящей работы — изучить видовые отличия толерантности к короткосрочным ГГ-стрессам, которые неизбежно возникают в различных областях профессиональной деятельности, в частности при запуске и посадке космических аппаратов. В настоящей публикации нами представлены данные, полученные у наиболее распространенных в экспериментальной практике видов лабораторных животных — дрозофил, мышей и крыс. Выбор этих видов был обусловлен также тем, что они существенно отличаются по массе тела и, вероятно, по реакции на ГГ-стресс.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы взрослые самцы дрозофил линии Oregon-R, мыши линии C57BL/6 и крысы линии Wistar.

ГГ-стресс моделировали центрифугированием в специальных контейнерах: дрозофил от 20 мин до 3 ч на центрифуге К-24; мышей и крыс в течение 10 мин на центрифуге К-70 (Германия). Величину ГГ (в единицах ускорения g свободного падения на

поверхности Земли) задавали изменением скорости вращения, которая контролировалась с помощью специального тахометра. Через 15, 30, 45, 60, 90 и 180 мин у подопытных животных измеряли интенсивность газообмена и температуру тела. При этом содержание кислорода и углекислого газа в исследуемых образцах воздуха определяли с помощью соответствующих блоков газоанализатора фирмы MINHARDT (Нидерланды), а ректальную температуру определяли с помощью электрического термометра с полупроводниковым датчиком, вмонтированным в тонкий шланг диаметром примерно 1 мм.

Интенсивность биосинтеза РНК и белка в условиях *in vitro* определяли по включению соответствующих меченых предшественников в суспензиях клеток, приготовленных из лобной коры головного мозга, гипоталамуса, мозжечка и левого желудочка миокарда, согласно Singh (1988). Интенсивность синтеза РНК оценивали по включению ^{14}C -UTP, согласно работе Марелаф, Хуан (1987), а синтеза белка — по включению ^3H -лейцина, согласно Клеменс (1987). Содержание белка в исследуемых образцах определяли по модифицированному методу Лоури (Markwell, 1978).

Полученные результаты обрабатывались с помощью стандартных методов статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из известной зависимости об отрицательной корреляции между размерами тела и толерантностью к ГГ-нагрузкам (Economos, 1979; Pace, Smith, 1981; Miquel, Souza, 1991), еще до начала экспериментов мы полагали, что дрозофилы окажутся более устойчивыми и в условиях нашей модели краткосрочного ГГ-стресса. Качественно это предположение оправдалось, а количественные данные, полученные на дрозофилах, превзошли все ожидания. Дрозофилы оказались не просто наиболее устойчивыми к ГГ: по этому параметру они превосходили мышей и крыс на несколько порядков, легко перенося ГГ в несколько тысяч g даже при увеличении экспозиции до нескольких часов. Если при 10-мин экспозиции мыши начинали погибать при 40 g , а крысы и того меньше, то у дрозофил наиболее слабые по ГГ особи начинали погибать только при 10000 g . Более того, даже при наиболее жестких из использованных нами режимов ГГ (20000 g , 3 ч) выживало более четверти мух (рис. 1). Феноменальная устойчивость дрозофил к ГГ, по всей видимости, сохраняется и при хронических ГГ-нагрузках. По крайней мере, как было показано в одном из немногих опытов, проведен-

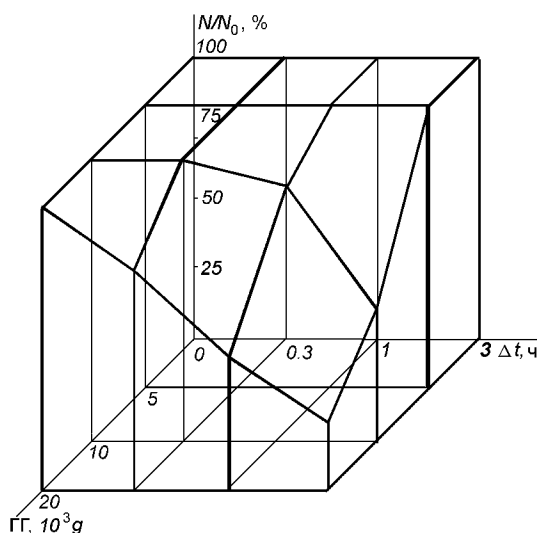


Рис. 1. Зависимость выживаемости N/N_0 дрозофил от длительности экспозиции Δt и силы гипергравитации ГГ

ных еще до запуска первых спутников Земли, дрозофилы успешно завершали эмбриональные и куколочные этапы развития при ГГ, равной 5000g (Wunder, 1955). Такая высокая толерантность к ГГ, возможно, обусловлена как небольшими размерами тела (масса тела взрослой дрозофилы обычно составляет 0.5—1 мг), так и тем, что, будучи холоднокровными, они обладают сравнительно низким уровнем обмена и, вероятно, эволюционно более простыми и потому более устойчивыми к ГГ механизмами сохранения жизнеспособности. Какими бы ни были причины и объяснения такой толерантности дрозофил к ГГ, ясно, что в обозримом будущем для них не должны существовать гравитационные барьеры ни при космических экспедициях, ни при колонизации планет с более мощными гравитационными полями.

Все же с прикладной точки зрения опыты на лабораторных млекопитающих представляют больший интерес в силу их эволюционной близости к человеку. В наших опытах при 10-мин экспозиции 100-% выживаемость у мышей сохранялась до 30g, а у крыс, которые по массе превосходят мышей в 20—30 раз, безопасный для жизни диапазон ГГ был вдвое меньше и не превосходил 15g. Гибели половины подопытных особей (LD50) соответствовала ГГ около 55—60g для мышей и 25g для крыс. И наконец, практически полное вымирание подопытных мышей и крыс наблюдалось при 90g и 40g соответственно (рис. 2).

Отрицательная корреляционная зависимость между массой тела и толерантностью к ГГ-стрессу

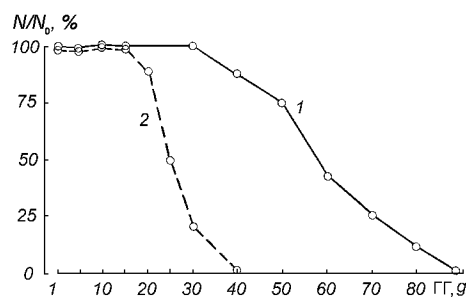


Рис. 2. Выживаемость N/N_0 мышей (1) и крыс (2) после ГГ-стресса

в целом сохраняется и при анализе этого феномена на внутривидовом и популяционном уровне, то есть при сравнении отдельных особей, хотя при этом она не так отчетливо выражена, как при сравнении разных видов. Это представляется вполне естественным, учитывая, что отличия массы тела на популяционном уровне выражены в значительно меньшей степени, чем при сравнении разных видов. Так, при ГГ-стрессе 50g и выживаемости 75 % средняя величина массы тела выживших мышей составляет 20.0 ± 0.3 г, а в группе погибших — несколько больше (21.3 ± 0.6 г). При увеличении ГГ до 60g выживаемость снижается до 33 %. Однако и при этом масса тела выживших (18.8 ± 0.8 г) несколько меньше, чем погибших (20.1 ± 0.5 г). Аналогичные результаты были характерны и для крыс. При 25g и выживаемости 50 % средняя величина массы тела выживших равнялась 244 ± 7 г, а погибших — 264 ± 1 г ($P < 0.05$). При увеличении ГГ до 30g выживаемость снижается до 25 %. При этом масса тела выживших составляет 240 ± 10 г, а погибших — 258 ± 4 г. Из представленных данных следует, что во всех проанализированных случаях средние величины массы тела выживших животных были меньше, чем погибших, хотя эти отличия в каждом конкретном случае далеко не всегда были статистически значимыми.

Основными причинами гибели животных при краткосрочных сеансах ГГ, по-видимому, являются повреждение тонкой структуры и острая гипоксия в жизненно важных органах, прежде всего в миокарде и головном мозге. При этом главными причинами гипоксии считаются перераспределение кровотока и затруднения дыхательных движений вплоть до их полной остановки. Однако не все ГГ-нагрузки сопровождаются снижением интенсивности дыхания. Как видно из рис. 3, в диапазоне умеренных и сублетальных ГГ-нагрузок (примерно 30g для мышей и 15g для крыс) потребление кислорода и выделение углекислого газа несколько

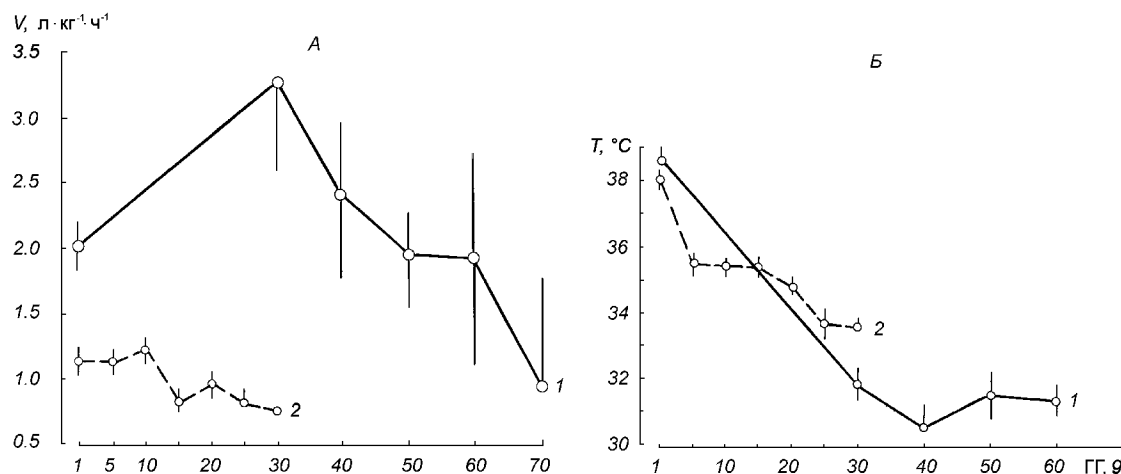


Рис. 3. Интенсивность выделения углекислого газа V и температура тела T у мышей (1) и крыс (2) после ГГ-стресса

увеличиваются, вероятно, из-за повышения нагрузки на опорно-двигательный аппарат и неизбежного возбуждения подопытных животных при центрифугировании. При более «жестких» ГГ-стрессах решающим фактором, видимо, становится затруднение дыхания, и по мере увеличения силы ГГ показатели газообмена прогрессивно снижаются. В диапазоне летальных ГГ-нагрузок примерно такая же динамика характерна для ректальной температуры тела, которая снижается, очевидно, вслед за снижением интенсивности газообмена (рис. 3). Основным отличием динамики температуры ядра тела от газообмена является отсутствие существенных видовых отличий и увеличения газообмена при сравнительно небольших силах ГГ.

Определенный интерес представляло изучение динамики интенсивности газообмена и ректальной температуры в постстрессовый период восстановления. Как следует из рис. 4, динамика интенсивности газообмена имела двухфазный характер: снижению газообмена при сеансе ГГ последовала фаза «избыточного» восстановления, очевидно направленная на компенсацию «кислородного долга», который возникает при центрифугировании. Эта фаза была относительно непродолжительной и примерно одинаковой для обоих исследованных видов: примерно через 1–2 ч после стресса наблюдалось практически полное восстановление исходного уровня как у мышей, так и у крыс. Восстановление ректальной температуры носило более монотонный характер и также мало различалось для обоих видов грызунов.

Как известно, в поддержании необходимого уровня метаболизма велика роль процессов пластической обеспеченности, биосинтеза нуклеиновых кис-

лот и белка. Вот почему в следующей серии опытов нами было изучено влияние ГГ-стресса на интенсивность биосинтеза тотальной РНК и белка в таких важных для сохранения жизнеспособности тканях, как левый желудочек миокарда, лобная кора, гипоталамус и мозжечок головного мозга. Оказалось, что у мышей сразу после краткосрочного сеанса ГГ (10 мин при 50g) вслед за интенсивностью газообмена и температуры тела синтез РНК и белка в большинстве тканей снижается. В наших опытах такое утверждение было справедливо по крайней мере для миокарда, коры и гипоталамуса (рис. 5). Вместе с тем в мозжечке интенсивность биосинтетических процессов после ГГ-стресса, вероятно, стимулировалась. Такое неожиданное увеличение уровня биосинтеза РНК и белка в мозжечке, возможно, связано с его особой ролью в координации движений, управлении работой опорно-двигательного аппарата и ориентации в пространстве, то есть систем, которые подвергаются наиболее выраженным изменениям при центрифугировании.

Таким образом, проведенные нами исследования по изучению влияния ГГ, включающих весь диапазон нагрузок — от пороговых до летальных — на дрозофил, мышей и крыс, показали, что существуют отчетливые видовые отличия толерантности к ГГ-стрессу. По выживаемости при ГГ холоднокровные, вероятно, имеют большую устойчивость. По крайней мере, в наших опытах лабораторные дрозофилы полностью выживали при ГГ до 5000g и по этому параметру оказались на несколько порядков более устойчивее, чем млекопитающие. Среди последних мыши были примерно вдвое устойчивее к ГГ, чем крысы. По мере увеличения силы стресса

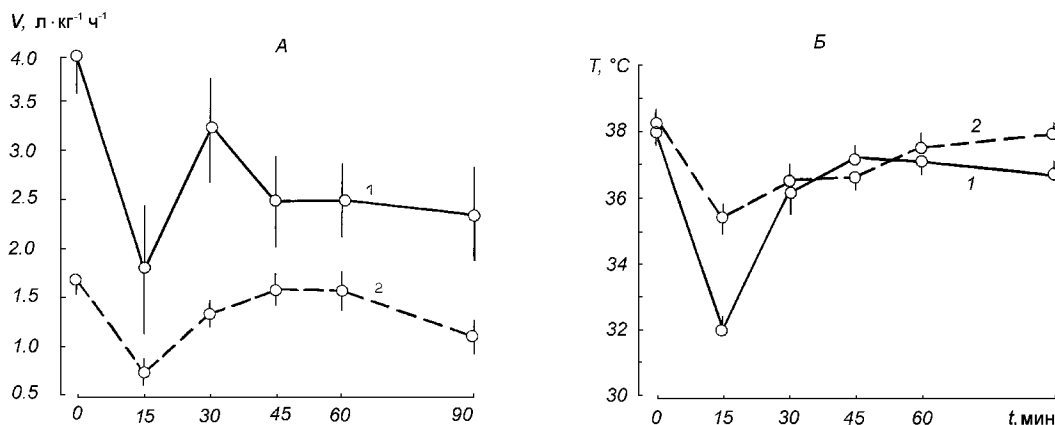


Рис. 4. Выделение углекислого газа V и температура тела T у мышей (1) и крыс (2) через время t после ГГ-стресса (10 мин при 50g и 25g соответственно)

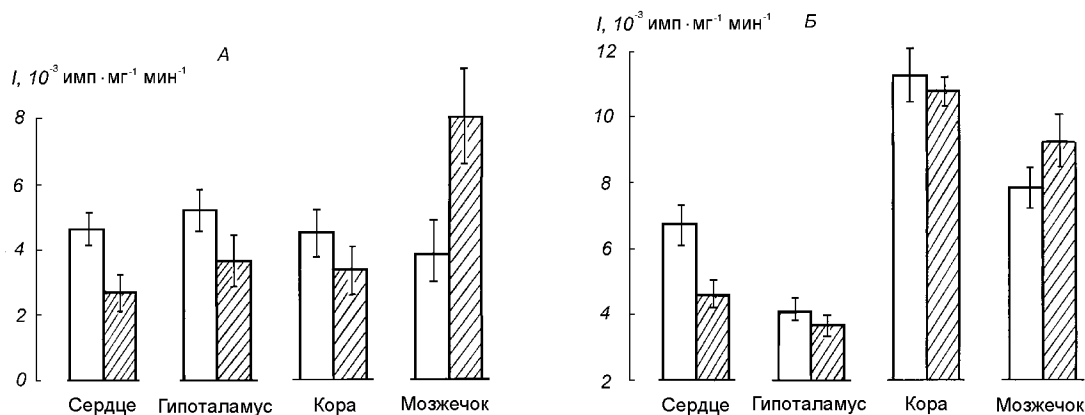


Рис. 5. Интенсивность I биосинтеза суммарной РНК (А) и белка (Б) в разных тканях мышей до (светлые столбики) и после (затрихованные столбики) ГГ-стресса (10 мин при 50g)

интенсивность потребления кислорода увеличивается в области сублетальных нагрузок, но после достижения летальных величин газообмен и температура тела прогрессивно снижаются по мере увеличения силы ГГ. Постстрессовый восстановительный период для показателей газообмена и температуры тела сравнительно невелик (до 1—2 ч) и существенно не различается для обоих видов. В большинстве тканей эти изменения в метаболизме, по всей вероятности, сопровождаются параллельным снижением интенсивности биосинтеза нуклеиновых кислот и белка. Хотя, как показали данные по биосинтезу РНК и белка в мозжечке, в зависимости от функционального назначения тканей возможны количественно и качественно разные изменения уровня метаболических и пластических процессов. В целом полученные данные могут представить определенный интерес как для понимания

видовых отличий толерантности к ГГ-стрессу и возможных механизмов его развития, так и при последующей разработке конкретных экспериментальных моделей и поиске возможных гравипротекторов, на что и направлены основные наши усилия в настоящее время.

Работа проведена при частичной финансовой поддержке Национального космического агентства Украины.

Клеменс М. Трансляция эукариотических матричных РНК в бесклеточных экстрактах // Транскрипция и трансляция. Методы / Под ред. В. Хаймса, С. Хигенса. — М.: Мир, 1987.—С. 327—362.

Марелаф У., Хуан Р. Транскрипция РНК в изолированных ядрах // Транскрипция и трансляция. Методы / Под ред. В. Хаймса, С. Хигенса. — М.: Мир, 1987.—С. 111—157.

Economos A. C., Miquel J., Ballard R. W., et al. Effects of stimulated increased gravity on the rate of aging of rats. Implications for the rate of living theory of aging // Arch.

- Geront. and Geriatrics.—1983.—1.—P. 349—363.
- Frol'kis V. V., Muradian Kh. K., Timchenko A. N. Hypergravity stress: species- and age-peculiarities of oxygen consumption, thermoregulation, and survival // III European Congress of Gerontology: Abstracts (Amsterdam, 30 August—2 September, 1995). — Amsterdam, 1995.—N 086.0078.
- Galileo G. Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove science. 1638 // Цитируется по Miquel, Souza (1991).
- Hughes-Fulford M. Altered cell function in microgravity // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 247—256.
- Le Bourg E., Lints F. A. Hypergravity and aging in *Drosophila melanogaster*. 2. Longevity // Gerontology.—1989.—35.—P. 244—252.
- Lee R. E., Bryant E. H., Baust J. G. Fecundity and longevity of housefly after spaceflight // Experientia.—1985.—41.—P. 1191—1192.
- Lints F. A., Bullens P., Le Bourg E. Hypergravity and longevity in *Drosophila melanogaster*. 7. New longevity data // Exp. Gerontol.—1993.—28.—P. 611—615.
- Malacinski G. M., Neff A. W. The influence of gravity in the process of development of animal systems // Adv. Space Res.—1984.—4.—P. 314—323.
- Markwell M. A., Haas S. H., Bieber L. L., Tolbert N. F. Modification of Lowry procedure to simplify protein determination in membrane and lipoprotein samples // Anal. Biochem.—1978.—85, N 1.—P. 206—210.
- Miquel J., Souza K. A. Gravity effects on reproduction, development, and aging // Advances in Space Biology and Medicine.—1991.—1.—P. 71—97.
- Nicogossian A. E., Yuntoon C. L., Pool S. L. Space Physiology and Medicine. — Philadelphia: Lea & Febiger, 1989.—478 p.
- Pace N., Smith A. H. Gravity and metabolic scale effects in mammals // The Physiologist.—1981.—24.—P. S37—40.
- Singh N. P. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells // Exp. Cell Res.—1988.—175.—P. 184—191.
- Wunder C. C. Gravitational aspects of growth of fruit fly larvae // Proc. Soc. for Exp. Biol. and Med.—1955.—89.—544 p.

EFFECTS OF HYPERGRAVITY STRESS ON INTENSITIES OF GASEOUS EXCHANGE, RNA AND PROTEIN SYNTHESIS, THERMOREGULATION, AND SURVIVAL OF ANIMALS OF DIFFERENT SPECIES

V. V. Frol'kis, Kh. K. Muradian,
F. N. Timchenko, and T. G. Mozzhukhina

The effects of hypergravity (HG) stress on survival, gaseous exchange, thermoregulation, and synthesis of total RNA and protein were studied in adult male drosophilas, mice, and rats. *Drosophilas* had much higher HG tolerance (up to 20000 g) compared to mice and rats, for whom LD50 were 55—60g and 25g, correspondingly at a 10-minute exposure. In the groups of mice and rats, the gaseous exchange increased in the range of mild and sublethal HG, but it decreased in the lethal range of HG stress. In this range the body temperature, as well as RNA and protein synthesis in myocardium, frontal cortex, and hypothalamus also decreased; by contrast, synthesis processes increased in cerebellum. In the post-stress period the gaseous exchange and body temperature recovered in about 1–2 hours.

УДК 581.2:58.057

Бактеріальне ураження огірків в умовах космічного польоту

Р. І. Гвоздяк, О. П. Коробко, О. Г. Азімцев

Інститут мікробіології та віросології ім. Акад. Д. К. Заболотного НАН України, Київ

Надійшла до редакції 25.03.97

Із загиблих сіянців огірків в умовах космічного польоту станції «Салют-6» виділені фітопатогенні бактерії родів *Bacillus*, *Pseudomonas* і *Erwinia*. Найбільш агресивним виявився ідентифікований вид *Bacillus polymyxa* Cohn 1872.

Для забезпечення життєдіяльності космонавтів при довготривалих космічних польотах необхідне надійне функціонування регенеруючої системи. В такій системі використовуються вищі рослини, які виділяють кисень, поглинають вуглекислий газ і являють собою продукти харчування. Тому безперервне вирощування рослин є одним із основних критеріїв надійності забезпечення життєвих умов космонавтів.

В багатьох експериментах по вирощуванню рослин на орбітальних станціях «Салют» спостерігали низьку схожість насіння та загибель значної кількості молодих рослин. При аналізах результатів польотних експериментів, а також спеціальних лабораторних дослідів називались дві причини, які привели до відмирання рослин, а саме:

- недосконалість технології культивування рослин у невагомості, внаслідок якої відбувається повне насичення субстрату водою і поява анаеробних умов в зоні кореневих систем;
- токсична дія на рослини, особливо на їх генеративні органи, мікродомішок атмосфери космічних апаратів (Парфенов, 1988).

Такі висновки, можливо, і справедливі, але вони не враховують можливості ураження рослин збудниками бактеріальних, грибних або вірусних захворювань. Взагалі хворобам рослин в космічних умовах не приділяється належної уваги. Окрім вивчення пухлиноутворення на зрізах корнеплодів моркви, що спричиняється бактерією *Agrobacterium tumefaciens* в умовах польотів біосупутників «Космос-782» та «Космос-1129» (Рубін та ін., 1979; Парфенов, 1988), дані про захворювання рослин в

науковій літературі відсутні.

Метою нашого дослідження було встановлення причини ураження сіянців огірків, які вирощувались в умовах космічного польоту станції «Салют-6», керованої космонавтами В. А. Ляховим та В. В. Рюїнім. Зразки отримані від В. А. Кордюма, за що висловлюємо йому щире подяку.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведено бактеріологічне дослідження уражених тканин стебел, сім'ядоль і коріння сіянців огірків та насіння, що не проросло. Уражені рослини мали такі симптоми: стебла мацеровані або некротизовані, сім'ядолі — скарлючені, коріння — бурого, коричневого або чорного кольору, коренева шийка некротизована з ознаками гнилі. Непроросле насіння наповнене білою м'якою гомогенною масою, а його оболонка мала сіре або темно-сіре забарвлення. Бактерії ізолювали на четверту добу після приземлення корабля із уражених тканин та субстрату, на якому вирощували рослини, безпосередньо та з попереднім ретельним відмиванням зразків стерильною водою. Зразки гомогенізували і висівали на тверді картопляне та м'ясо-пептонне середовища (Бельтюкова та ін., 1968).

Вивчення фітопатогенних властивостей виділених ізолятів проводили шляхом замочування насіння у водній суспензії клітин бактерій (титр 10^8 кл/мл) на протязі 3 годин з наступним пророщуванням спочатку в термостаті (27 °C, 3 доби), а потім при кімнатній температурі. Проростки іноку-

лювали методом уколів через краплю суспензії та шляхом внесення 5—10 мл суспензії бактерій у кореневу систему. Морфологічні та фізіолого-біологічні ознаки ізолятів вивчали загальноприйнятими в мікробіології методами (Cowan, Steel, 1965; Бельтюкова та ін., 1968; Korobko, 1988), ідентифікацію штамів зроблено згідно з визначником бактерій (Bergey's, 1986).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Всього проаналізовано 16 зразків і виділено 83 штами бактерій. Виділені ізоляти відрізнялись між собою патогенними властивостями. За симптомами та ступенем ураження при штучній інокуляції насіння та сіянців огірків ізоляти розподілено на чотири групи, а саме:

- 1) сильно агресивні, що спричиняли інтенсивну гниль насіння, стебел, коріння та плямистість сім'ядолей;
- 2) помірно агресивні, що викликали тільки плямистість на сім'ядолях;
- 3) слабо агресивні, що спричиняли незначне загнивання насіння та некротизацію кореневої системи;
- 4) непатогенні ізоляти.

За морфологічними, культуральними, фізіолого-біохімічними властивостями виділені штами віднесені до родів *Bacillus*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Escherichia* і *Aeromonas*. Найбільш вірулентними виявились штами роду *Bacillus*, які ідентифікували як *B. polymyxa* Cohn 1872. Основні їх характеристики: бактерії спороносні, спори еліпсоподібні, які розташовані в основному в центрі клітини і рідше

— на її кінці. Розмір спор становив $(0.9—1.1) \times (1.8—3.0)$ мкм. Вегетативні клітини являють собою тонкі палички із загостреними кінцями розміром $(0.3—0.5) \times (1.9—3.1)$ мкм. При спороутворенні клітини роздувались; за Грамом фарбувалися негативно в молодому віці (18—20 год росту на твердому середовищі) і позитивно — в старій культурі (48 год росту). Колонії на картопляному середовищі непрозорі, блискучі, круглі, бурого або коричневого кольору після семи діб вирощування при 27 °C з ущільненим центром та вираженою боріздкою навколо нього (рис. 1). Діаметр колонії досягав 7—9 мм.

Бактерії продукували пектиназу, зсідали і пептонізували молоко, підкислювали лакмусову сироватку, не утворювали оксидазу, тирозиназу, індол, сірководень, кислоту на середовищі з метил червоним (MR), не утилізували ацетат та цитрат натрію на середовищі Симонса, не росли на глюкозі в аеробних та анаеробних умовах на середовищі Хьюг—Лейфсона. На рекомендованому для спорових бактерій середовищі № 1 (Gibson, Gordon, 1974) виділені штами утилізували маніт, арабінозу, ксилозу та глюкозу з виділенням кислоти, а на середовищі № 2 — кислоти та газу.

На мінеральному середовищі Омелянського із 16 вуглеводами шість цукрів (лактозу, мальтозу, сахарозу, дульцит, саліцин, рамнозу) ці бактерії зовсім не утилізували, а інші споживали повільно і слабо.

Порівнюючи ознаки виділених спорових бактерій з видами роду *Bacillus*, які мають, як і ізольовані нами, пектолітичні ферменти (табл. 1), встановлена їх ідентичність з видом *Bacillus polymyxa* Cohn 1872.

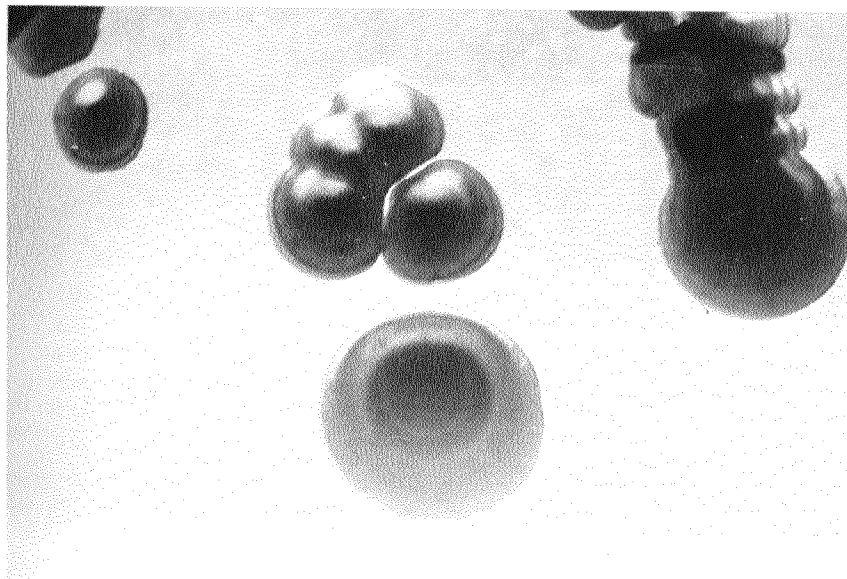


Рис. 1. Колонії *Bacillus polymyxa* на твердому картопляному середовищі на сьому добу інкубації при 27 °C (4.3^х)

При штучному зараженні штами *B. polymyxa* спричиняли гниль насіння огірків в залежності від штаму в межах 33.3—83.3 % (табл. 2); збільшували кількість деформованих проростків в 5—19 раз, які відставали в рості в 1.5—4 рази (рис. 2),

Таблиця 1. Порівняльна характеристика ізолюваних із огірків бактерій *B. polymyxa* із близькими видами роду *Bacillus*

Властивості бактерій	Cowan, Steel, 1965; Bergey's, 1986			Виділені на-ми штами
	<i>B. subtilis</i>	<i>B. polymyxa</i>	<i>B. thuringiensis</i>	
Забарвлення клітин за Грамом	+	-/+	-/+	-/+
Вегетативна клітина слабо випукла або пряма. Спори овальні або циліндричні, стінка спори тонка	+	-	-	-
Вегетативна клітина виражено випукла. Спори овальні, рідше – циліндричні. Стінка спори товста	-	+	+	+
Наявність перитрихальних джгутиків	+	+	+	+
Утилізація глюкози	+	+	+	+
Утилізація арабінози, маніту	+	+	+	+
Утилізація цитрату	+	-	-	-
Гідроліз желатину	+	+	+	+
Гідроліз казеїну	+	+	-	+
Гідроліз крохмалю	+	+	+	+
Продуктування індолу, лецитинази	-	-	-	-
Продуктування ацетоїну	+	+	-	+
Продуктування уреаз	-/+	-	-	-
Редукція нітратів	+	+	+	+

Примітка. «+» — позитивний результат, «-» — негативний результат, «-/+» — варіабельний результат, «г» — продуктування газу.

а їх корінці загнивали. На сім'ядолях утворювались світло-коричневі, часто дірчасті, або сірі з коричневим центром та дифузним хлорозним обідком плями, які розповсюджувались з часом на всю поверхню сім'ядолей. При внесенні суспензії бактерій у кореневу систему корені ставали бурими, некротизувались і відпадали, що призводило до загибелі рослин.

Оскільки на станції «Салют-6» проводились експерименти з пшеницею, проростки якої теж загинули, ми дослідили вплив ізолюваних штамів *B. polymyxa* на насіння та проростки пшениці. Виявилось, що обробка насіння бактеріями викликає їх загнивання в межах 10—80 % в залежності від штамів, кількість деформованих рослин становила 10—20 % (табл. 3). Коренева система некротизувалась та загнивала, а проростки відставали у рості (рис. 3).

Загнивання насіння і проростків огірків та пшениці під впливом бактерій *Bacillus polymyxa* вказувало на здатність їх утворювати пектолітичні ферменти, що було підтверджено у дослідях з іншими видами рослин. Нанесення бактеріальної маси клітин на соковиті тверді тканини плодів огірків, динь, кавунів, кабачків, патисонів, моркви, буряків та картоплі викликало їх мацерацію через 24—48 год після інокуляції.

Серед бактерій роду *Pseudomonas* виділені патогенні і непатогенні штами бактерій, які були грам-негативними, з полярними джгутиками, строгими аеробами, флуоресцентними на середовищі Кінга-Б та пептонному бульйоні. Вони пептонізували молоко, на лакмусовій сироватці утворювали луг, продукували оксидазу або її не мали. Патогенні штами утворювали пектиназу, непатогенні — її не мали.

Штами роду *Erwinia*, які викликали при штучному зараженні насіння огірків плямистість на сім'я-

Таблиця 2. Результати інфікування насіння огірків сорту Неросимий-40 штамами *Bacillus polymyxa*

Номери штамів, якими інфікували насіння	Одержано проростків				Насіння, яке наклюнулось, але загинуло або покритись плямами	
	всього		в тому числі деформованих			
	кількість	доля, %	кількість	доля, %	кількість	доля, %
Контроль (без обробки)	27	90.0	1	3.3	3*	10.0
1070б	16	53.3	8	26.7	14	46.7
1071а	5	16.7	5	16.7	25	83.3
1074г	13	43.3	13	43.3	17	56.7
1075б	20	66.7	5	16.7	10	33.3
1076а	17	56.7	17	56.7	13	43.3
1077г	19	63.3	19	63.3	11	36.7
1078д	16	53.3	8	26.7	14	46.7
1079д	9	30.0	9	30.0	21	70.0

* — насіння не проросло і не загинуло.
Кожним штамом інфіковано 30 насінин.

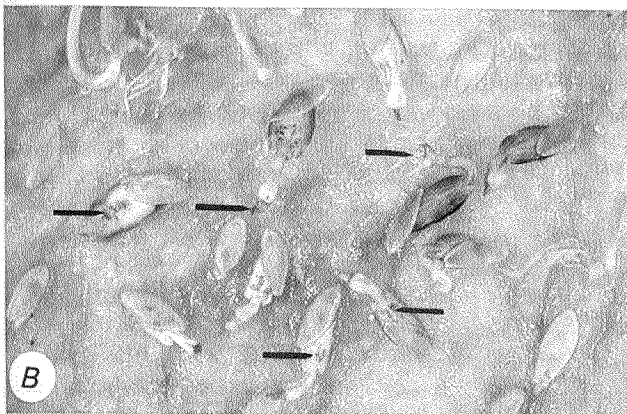
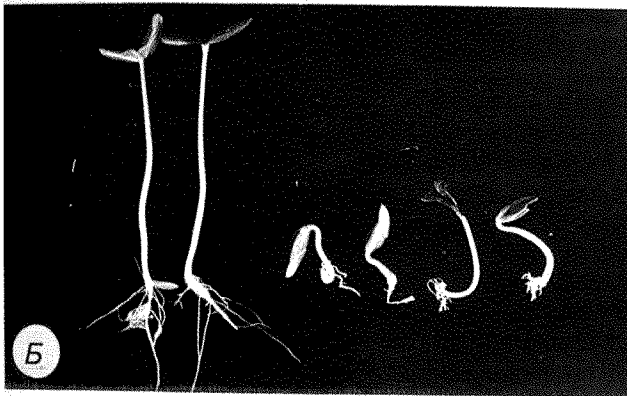
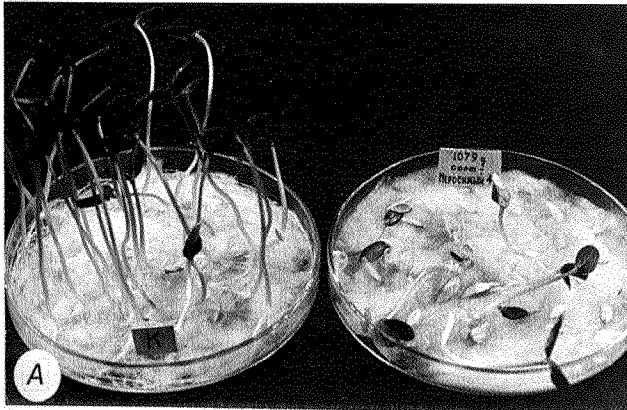


Рис. 2. Проростки огірків сорту Неросимий-40, одержані із штучно зараженого насіння *B. pouluxa*, 1079д: А — більшість насінин загнило, поодинокі проростки деформовані, карликові; Б — деформовані проростки огірків з відмерлою кореневою системою. Зліва — контрольні неінфіковані рослини; В — уражені сім'ядолі огірків. Стрілками помічені відмерлі корінці, некротичні плями та виразки

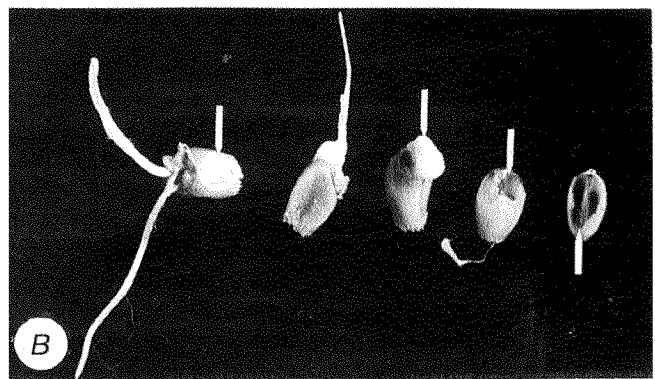
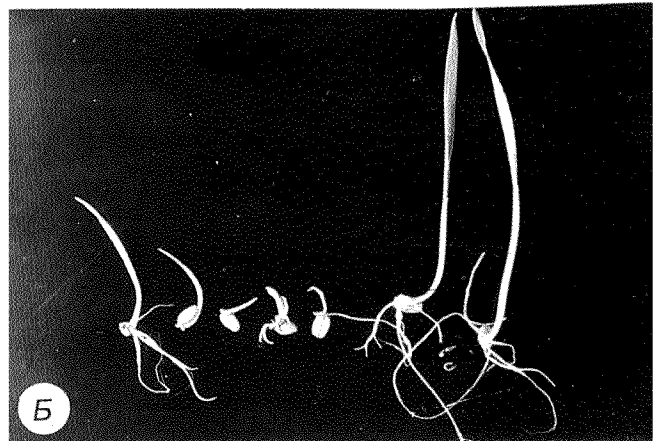
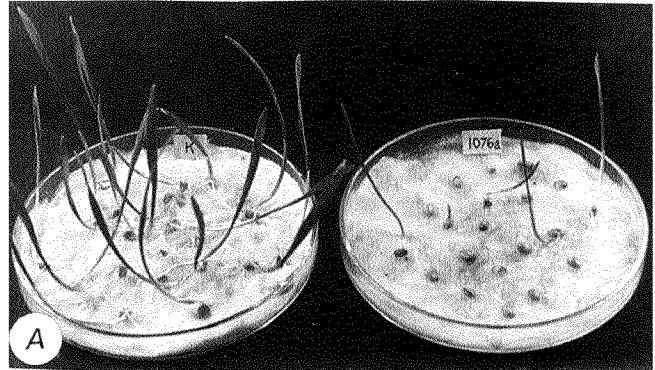


Рис. 3. Проростки пшениці, одержані із інокульованих зерен *B. pouluxa*, 1076а: А — контрольні неінокульовані рослини (зліва), справа — більшість зерен не проросло і загнило; Б — недорозвинуті проростки з відмерлою кореневою системою (зліва) та контрольні рослини (справа); В — уражені зерна пшениці *B. pouluxa*. Стрілками помічені екссудат, що утворився, порожнини та виразки

Таблиця 3. Результати інфікування насіння пшениці штамами *Bacillus polymyxa*

Номери штамів, якими інфікували насіння	Одержано проростків				Гниле насіння	
	всього		в тому числі деформованих			
	кількість	доля, %	кількість	доля, %	кількість	доля, %
Контроль (без обробки)	19	95	0	0	1*	5
1070б	4	20	1	5	16	80
1071а	8	40	4	20	12	60
1074г	18	90	1	5	2	10
1075б	13	65	2	10	7	35
1076а	4	20	2	10	16	80
1077г	15	75	2	10	5	25
1078д	17	85	0	0	3	15
1079д	7	35	1	5	13	65

* — зерно не загнило.

Кожним штамом інфіковано 20 зерен.

долях (рис. 4), та загивання насіння були факультативно анаеробними, грамнегативними з перитрихальними жгутиками, пектиназо- та каталазопозитивними, оксидазонегативними, не редукували нітрати, не виділяли індол, не гідролізували крохмаль і казеїн, не продукували уреазу, не розріджували желатин, утилізували нітрати та різні вуглеводи з виділенням кислоти, а на деяких цукрах і газу.

До роду *Escherichia* віднесені штами, які були непатогенними, або спричиняли незначний некроз кореневої системи огірків, за біохімічними властивостями близькі до бактерій роду *Erwinia*, але не утилізували натрієву сіль лимонної кислоти, редукували нітрати, продукували індол, активно утилізували (через 20 год) 16 різних вуглеводів з виділенням великої кількості газу та кислоти.

Окрім названих вище бактерій, виділені непатогенні та слабо вірулентні штами, що спричиняли незначне ушкодження кореня та сім'ядолей (не-

кроз) і характеризувалися ознаками, які притаманні як ентеробактеріям, так і псевдомонадам. Штами продукували оксидазу, ацетонін, уреазу, розріджували желатин, зсідали молоко, підкислювали з наступною редукцією лакмусову сироватку, редукували нітрати, утилізували в аеробних та анаеробних умовах глюкозу та 15 інших вуглеводів з виділенням кислоти та великої кількості газу. Клітини грамнегативні, мали форму паличок з полярними джгутиками, спор не утворювали. За наведеними властивостями ці мікроорганізми подібні до бактерій роду *Aeromonas*. Вони не представляли загрози ураження рослин.

Таким чином, встановлено, що загиблі сіянці огірків в умовах космічного польоту на станції «Салют-6» були уражені фітопатогенними бактеріями. Найбільш агресивними являються штами, що продукують пектиназу і які за морфологічними та біохімічними властивостями віднесені до родів

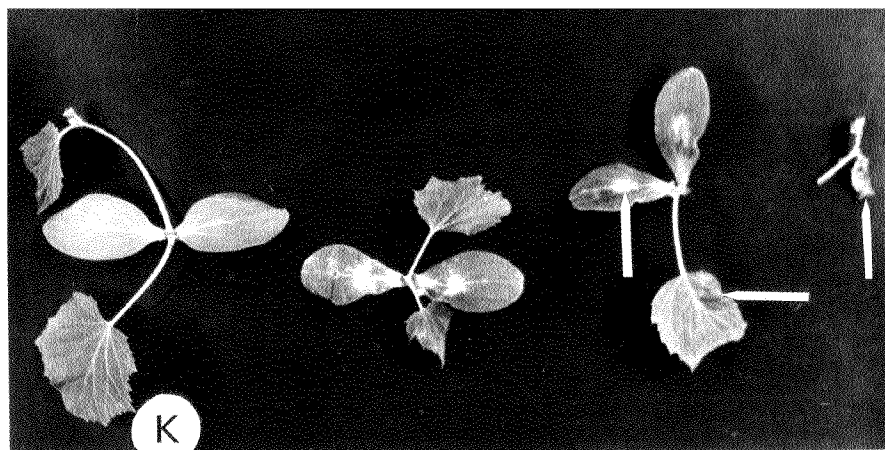


Рис. 4. Уражені плямистістю сім'ядолі та листя огірків внаслідок інюляції насіння *Erwinia* sp. Зліва — неінфіковані контрольні рослини (К)

Bacillus, *Pseudomonas* та *Erwinia*.

Інші штами, умовно віднесені нами до родів *Escherichia* і *Aeromonas*, не причетні до загибелі рослин, хоч і спричиняли незначні ушкодження сіянців в експериментах.

Яким чином різноманітні бактерії, як патогенні, так і авірулентні, потрапили в систему вирощування огірків в умовах космосу, невідомо. Можливо, через насіння, оскільки ретельна дезинфекція не завжди знешкоджує інфекцію, яка може знаходитись під оболонкою насінини, або глибоко в її тканинах (Коробко, 1997).

Відомо, що збудники захворювань рослин потрапляють в космічні літаючі апарати з космічними кораблями, космонавтами, при доставці вантажу, через рослинну продукцію, а також насіння, попередня дезинфекція якого не гарантує звільнення від інфекції. Гіфальні гриби, дріжджі та бактерії різних таксономічних груп ізольовані із поверхні космічних кораблів, інструментів, води, повітря, харчів та від космонавтів. Більшість із цих мікроорганізмів притаманна людям в наземних умовах (Puleo et al., 1973; Nelson, 1987). Серед численних грибів та бактерій, виділених із поверхні космічних кораблів та від космонавтів є і фітопатогенні, а саме аскоміцети (рід *Leptosphaeria*), зигоміцети (роди *Mucor*, *Rhizopus*), дейтероміцети, (роди *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Helminthosporium*, *Phoma* та ін.) та бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus* і *Corynebacterium* (Nelson, 1987). Оскільки космічні умови негативно не впливають на виживання, розмноження, морфологію, біохімічні ознаки, мутабельність досліджених ентробактерій, *B. subtilis*, *B. thuringiensis*, *B. brevis* та збудника бактеріального раку рослин *A. tumefaciens* (Парфенов, 1988; Кордюм та ін., 1984), існує реальна можливість фітопатогенних мікроорганізмів спричинити ураження та загибель рослин, що і було показано нашими дослідженнями. Окрім встановлених джерел фітопатогенної інфекції, слід враховувати також те, що люди є носіями деяких бактерій, що спричиняють захворювання як людей, так і рослин (Starr, 1979; Гвоздяк, 1981). З іншого боку, існують фітопатогенні бактерії, зокрема роду *Erwinia*, спроможні уражувати теплокровні тварини (Коробко та ін., 1975), та продукувати ферменти патогенності (плазмокоагулазу, гіалуронидазу, лецитиназу та гемолізувати еритроцити крові (Слабоспицька, Коробко, 1977). Наведені властивості мікроорганізмів повинні враховуватись в замкнених системах космічних польотів.

Таким чином, нами показана можливість ураження рослин в умовах космічних польотів бактеріями родів *Bacillus*, *Pseudomonas* і *Erwinia*.

Встановлений факт має бути врахованим при подальшій розробці технології вирощування рослин в регенеруючих системах довготривалих космічних польотах.

- Бельтюкова К. И., Матышевская М. С., Куликовская М. Д., Сидоренко С. С. Методы исследований возбудителей бактериальных болезней растений. — Киев: Наук. думка, 1968.—316 с.
- Гвоздяк Р. И. Полибиотрофия бактерий // Микробиол. журн.—1981.—43, № 2.—С. 256—262.
- Кордюм В. А., Нефедов Ю. Л., Кожариков В. И. и др. Особенности роста и строение клеток *Proteus vulgaris* при культивировании в невесомости в приборе «Цитос» // Биологические исследования на орбитальных станциях «Салют» — М.: Наука, 1984.—С. 33—38.
- Коробко А. П. Обеззараживание семян капусты от возбудителей бактериозов // Микробиол. журн.—1997.—59, № 3.—С. 65—70.
- Коробко А. П., Гвоздяк Р. И., Лемещенко Г. П. Зоопатогенные свойства возбудителя сосудистого бактериоза огурцов // Фитопатогенные бактерии. — Киев: Наук. думка, 1975.—С. 88—95.
- Парфенов Г. П. Невесомость и элементарные биологические процессы // Проблемы космической биологии. — Л.: Наука, 1988.—Т. 57.—С. 12—169.
- Рубин Б. А., Ладыгина М. Е., Воронков Л. А. и др. Эксперименты с корончатыми галлами моркови. Физиологическое состояние опухолевой ткани, индуцированной *Agrobacterium tumefaciens* // Биологические исследования на биоспутниках «Космос». — М.: Наука, 1979.—С. 126—136.
- Слабоспицкая А. Т., Коробко А. П. Изучение гемолитической, плазмокоагуляционной и гиалуронидазной активности бактерий рода *Erwinia* // Микробиол. журн.—1978.—40, № 6.—С. 727—730.
- Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. — Baltimore, Hong-Kong, London, Sydney: Williams and Wilkins, 1986.—V. 2.—P. 1105—1139.
- Cowan S. T., Steel K. J. Manual for the identification of medical bacteria. — Cambridge, 1965.—217 p.
- Gibson T., Gordon R. E. Genus *Bacillus* // Bergey's Manual of Determinative Bacteriology, 8th Ed. The Williams and Wilkins Company, 1974.—P. 529—550.
- Korobko A. P. Manual for study and identification of plant pathogenic bacteria. — Scientific Phytopathological Laboratory of the State Agro-Industrial Committee of the USSR. Ambo. Ethiopia, 1988.—200 p.
- Nelson B. The role of plant pathology in development of controlled ecological life support systems // Plant Disease.—1987.—71, N 7.—P. 580—584.
- Puleo J. R., Oxborrow G. S., Fields N. P., et al. Microbiological profiles of four Apollo spacecraft // Appl. Microbiol.—1973.—26, N 6.—P. 838—845.

BACTERIAL DISEASE OF CUCUMBERS IN SPACE-FLIGHT CONDITIONS

R. I. Gvozdiak, A. P. Korobko, and A. G. Azimtscev

Phytopathogenic bacteria of the *Bacillus*, *Pseudomonas*, and *Erwinia* genera have been isolated from the cucumber seedlings which perished in space-flight conditions. The species *Bacillus polymyxa* Cohn 1872 turned out to be the most virulent.

УДК 616.45-001.1/3:612.67/68:531.5

Геропротекторы как гравипротекторы?

В. В. Фролькис, Х. К. Мурадян, А. Н. Тимченко,
Е. И. Жеребицкая, А. А. Лимарева

Институт геронтологии АМН Украины, Київ

Надійшла до редакції 07.03.97

В роботі оглядово-проблемного характеру обговорюються ряд питань, що знаходяться на «стику» геронтології і космічної біології. Особливу увагу надано аналізу впливу гравітаційних факторів на паттерн старіння та тривалість життя, а також розробці підходів до експериментального пошуку засобів, здатних послабити негативні наслідки впливу мікро- і гіпергравітації. Обговорюються отримані авторами дані про можливість використання калорійно-обмежених раціонів з метою підвищення толерантності до гіпергравітаційного стресу.

Космос всегда обладал притягательной силой, как для юных, так и пожилых людей, независимо от возраста. Тем не менее в настоящее время участие в космических полетах стало «привилегией» в основном мужчин молодого и среднего возраста, хотя, как показали американцы Карл Хенеце и Венс Брандт, «побывавшие» в космосе в возрасте 58 и 59 лет соответственно, космические нагрузки, видимо, под силу и людям старших возрастов. Более того, существует не лишнее мнение о том, что на самые опасные космические экспедиции, по крайней мере из морально-этических соображений следует отправлять только людей зрелого возраста, уже имеющих детей и внуков. Но как бы эти проблемы ни решались, совершенно очевидно, что в скором времени участниками космических полетов окажутся люди самого разного возраста. Более того, при организации экспедиций на отдаленные объекты длительность полетов может стать соизмеримой с продолжительностью жизни (ПЖ) человека или даже превосходить ее, и это значит, что люди будут в космосе до глубокой старости, возможно, даже в течение нескольких поколений. Это обосновывает необходимость более пристального внимания к изучению возрастного аспекта влияния факторов космического полета на человека. При этом

следует отличать две взаимосвязанные и вместе с тем до определенной степени самостоятельные проблемы: первая — как факторы космических полетов влияют на здоровье людей разного возраста; вторая и, быть может, центральная во всей космической биологии, — как влияет длительное пребывание в космосе на паттерны старения и сопутствующей патологии. В этой связи, наверное, оправдано выделение в качестве самостоятельной дисциплины **космической этагенологии** (эта — возраст, генеология — наука о развитии), то есть науки, призванной изучать влияние космических факторов на все этапы индивидуального развития.

В настоящее время в космической медико-биологической науке существует еще одна неотложная геронтологическая задача — это те самые некогда молодые и «привилегированные» космонавты. Необходимо регулярное и всестороннее обследование их биологического возраста, темпов старения и типа распределения ПЖ. Ведь это уникальная группа людей, прошедших жесткий медицинский отбор и «элитарных» по многим параметрам здоровья и работоспособности в тяжелых условиях. Сравнение указанных показателей у космонавтов с аналогичными данными у «дублеров», почему-либо не побывавших в космосе, а также с общим насе-

лением может дать много полезного не только для летчиков, но и для понимания самих механизмов старения и выявления детерминантов индивидуальной ПЖ человека. Сейчас важно не упустить момент, так как большая группа космонавтов как-то «незаметно» перешла из молодых в старшие возрастные группы, к сожалению, по предварительным оценкам отличающиеся высоким уровнем смертности.

До первого выхода на орбиту было немало прогнозов, нередко взаимоисключающих, о возможном влиянии факторов космического полета на различные параметры организма, в том числе на темпы старения и ПЖ. Однако вскоре стало очевидным, что в очередной раз ближе к истине оказались пессимистически настроенные исследователи; оказалось, что полеты в космос опасны не только из-за высокого риска аварий, но и из-за большого «букета» неблагоприятных воздействий, включающего повышенный уровень ионизирующей радиации, вибрации и звука, абнормальные циркадные ритмы, различного рода физиологические и психологические нагрузки и др. (Nicogossian et al., 1989; Cristofalo, 1991; Czeisler et al., 1991; Miquel, Souza, 1991). Но, пожалуй, среди неблагоприятных факторов, характерных для космических полетов, гравитация занимает ведущее положение по выраженности и разнообразию вызванных ею отрицательных эффектов. Стало ясно, что все мы «немножко Антеи», и в космосе, оторвавшись от Земли, быстро теряем силу. Более того, сколь-нибудь продолжительное пребывание в невесомости сулит комплекс нарушений, весьма сходных с таковыми, наблюдаемыми в глубокой старости (Nicogossian et al., 1989; Charles, Bungo, 1991; Hughes-Fulford, 1991; Criswell-Hudak, 1991; Ray, 1991; Schultheis, 1991).

Следует помнить, что по сравнению с гравитацией Земли (1g), на различных стадиях полета возможны не только количественные, но и качественные изменения силы гравитации: гипергравитацией (ГГ) при старте, которая сменяется микрогравитацией (МГ) или невесомостью на орбите и снова ГГ при посадке. Это, естественно, еще более осложняет подбор средств защиты от гравитационных факторов, влияние которых на состояние организма в общем виде было предсказано Циолковским еще в прошлом веке. Однако многие важные аспекты этой проблемы, в частности влияние факторов гравитации на особенности старения и ПЖ, до настоящего времени остаются спорными или мало изученными. Достаточно сказать, что до сих пор не проведен ни один эксперимент, в котором изучалось бы влияние МГ на полный цикл онтогенеза, включая старение; до сих пор не разработаны

сколь-нибудь удовлетворительные модели МГ в земных условиях, а в тех опытах, которые были проведены на борту биоспутников, длительность пребывания животных в невесомости, как правило, соответствовала лишь небольшой части их видовой ПЖ, что, к сожалению, справедливо даже для опытов, проведенных на таких короткоживущих видах, как дрозофилы.

Как известно, у животных определенная часть энергии (примерно до одной четверти-трети потребленных калорий) уходит на поддержку «антигравитационных» реакций (Bourne, 1963). По-видимому, снижение таких затрат могло привести к продлению жизни, так как существует отчетливая обратная зависимость между интенсивностью метаболизма и ПЖ (Frolkis, Muradain, 1991). Более того, примерно в такой же степени калорийно-ограниченные рационы (КОР) считаются наиболее надежным средством продления жизни у млекопитающих (Фролькис, Мурадян, 1992). В связи с этим в геронтологической литературе до сих пор дискутируется возможное влияние гравитационных факторов разной силы на старение и ПЖ. При этом одной из ключевых закономерностей считается показанная Kleiber (1961) зависимость, согласно которой у животных в условиях земного притяжения интенсивность метаболизма (M) пропорциональна массе тела (m) в степени $3/4$ ($M = km^{3/4}$, где k — константа размерности); в невесомости интенсивность метаболизма пропорциональна массе в степени $1/2$ ($M = km^{1/2}$), а при ГГ интенсивность метаболизма становится пропорциональной массе в первой степени ($M = km$). Исходя из этих зависимостей, многие полагают, что снижение метаболизма при невесомости могло привести к продлению жизни, а его усиление при ГГ, наоборот, должно вызвать сокращение ПЖ (Miquel, Souza, 1991). Действительно, при умеренной ГГ почти у всех испытанных биологических объектов наблюдается усиление потребления кислорода, по всей вероятности, из-за увеличения нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Как было показано в опытах с хронической ГГ, такое усиление метаболизма сопровождается пропорциональным ускорением темпов старения и сокращением ПЖ. Например, в опытах, проведенных в исследовательских центрах NASA на лабораторных млекопитающих, в частности при постоянном содержании крыс в центрифуге, моделирующей ГГ около 3g, потребление пищи и кислорода увеличивалось примерно на 15 %, а средняя и максимальная ПЖ сокращались примерно на такую же величину (Economos et al., 1983). При ГГ 4g на фоне увеличения потребления кислорода и пищи на 25 % также наблюдалось пропор-

циональное сокращение ПЖ примерно на четверть (Ouyama, Chen, 1973). У дрозофил сокращение ПЖ проявляется, очевидно, только при 5g с последующим экспоненциальным ускорением старения и сокращения ПЖ по мере увеличения ГГ до 7g и более (Le Bourg, Lints, 1989; Lints, Le Bourg, 1993).

Несколько иначе, чем предполагалось, обстоят дела в невесомости. Уже первые эксперименты показали, что потребление кислорода и пищи у взрослых животных, впервые оказавшихся в условиях МГ, не только не снижается, но и увеличивается. Наиболее вероятной причиной такого парадоксального повышения метаболизма считается «стресс невесомости», вызванный, по-видимому, нарушением сигнализации, идущей от вестибулярного аппарата, и пространственной дезориентацией, которые в итоге приводят к дополнительным и малокоординированным движениям в непривычных условиях. Аналогичная картина, по-видимому, характерна и для космонавтов, энергетические расходы которых в невесомости повышаются и для которых во время полета предусмотрены высококалорийные рационы.

В невесомости в той или иной степени нарушается нормальное функционирование практически всех физиологических систем. Но наиболее выраженные изменения, по всей вероятности, происходят в опорно-двигательном аппарате (Schultheis, 1991) и в системе кровообращения (Charles, Bungo, 1991). Как полагают многие специалисты, например большинство участников «Геронтологических совещаний», которые регулярно организуются NASA еще с 1970-х гг., атрофия из-за недостаточной нагрузки и других факторов адаптации к невесомости приводит к синдромам, характерным для преждевременного старения. Между молодыми людьми на орбите и пожилыми на Земле существует много сходных структурно-функциональных изменений в целом ряде важных для сохранения работоспособности и жизнеспособности систем, включая такие нарушения, как снижение выброса крови и повышение кровяного давления; ослабление мочеотделения и уменьшение жизненного объема легких; деминерализация костной и мышечной тканей; снижение клеточной массы на фоне жировой инфильтрации и роста коллагеновых волокон, в частности, в мышцах. В опорно-двигательном аппарате происходят и другие выраженные атрофические и дегенеративные изменения, которые приводят к снижению силы сокращения и появлению признаков старческой «сутуловатости» (Smith, Port, 1991). Существенные изменения происходят в иммунной системе (Criswell-Hudak, 1991; Kimzey et al., 1976; Cogoloi, Tschopp, 1985) и в нейрогумо-

ральной регуляции, в частности в системах, опосредованных гормонами гипоталамуса и надпочечников (Humer, Grindeland, 1991). Сходство влияния невесомости со старением проявляется даже на таком очевидном признаке, как замедление роста ногтей (Miquel, Souza, 1991). Все это дает основание полагать, что для человека именно гравитационные факторы являются наиболее опасными среди различных неблагоприятных воздействий, характерных для космических полетов. Как отмечал летчик-космонавт Валерий Поляков, которому принадлежит абсолютный рекорд по длительности пребывания в космосе (679 сут), «невесомость — это агрессор, это враг, который действительно способен превратить цветущего мужчину в старика. С ним необходимо активно бороться.» («Киевские новости», 24 января 1997 г.).

В последние годы в нашем коллективе заинтересовались возможностью поиска средств, направленных на ослабление отрицательных последствий влияния гравитационных факторов на выживаемость и старение. В настоящей работе представлены наши данные по экспериментальному поиску средств для повышения толерантности к краткосрочным ГГ-нагрузкам, которые обычно возникают при запуске и посадке космических аппаратов и которые не только способны снижать работоспособность, но и могут представлять прямую угрозу для жизни находящихся на борту биологических объектов. Например, при спуске по наикратчайшей, так называемой «вертикальной» траектории ГГ может достигнуть до 100g и более. В нормальных условиях завершения полета, если на борту имеются биологические объекты, естественно, выбирается более «горизонтальная» и длинная траектория. Однако при внештатных и аварийных ситуациях типа разгерметизации или пожара, когда предотвращение жертв может определяться минутами или даже секундами, наличие на борту спускаемого аппарата средств, позволяющих повысить толерантность к ГГ и выбрать более короткую траекторию, несомненно, может стать решающим фактором для успешности всей экспедиции. Вот почему поиск «антигипергравитационных» средств имеет не только теоретическое значение, но и представляет определенный прикладной интерес.

Приступая к поиску таких средств, названных нами **гравипротекторами**, мы придавали принципиальное значение правильности выбора двух факторов — биологического объекта испытаний и потенциальных гравипротекторов. Проведенный нами комплекс исследований с использованием животных разного возраста и вида подтвердил, что и в наших условиях эксперимента (10-мин сеанс ГГ)

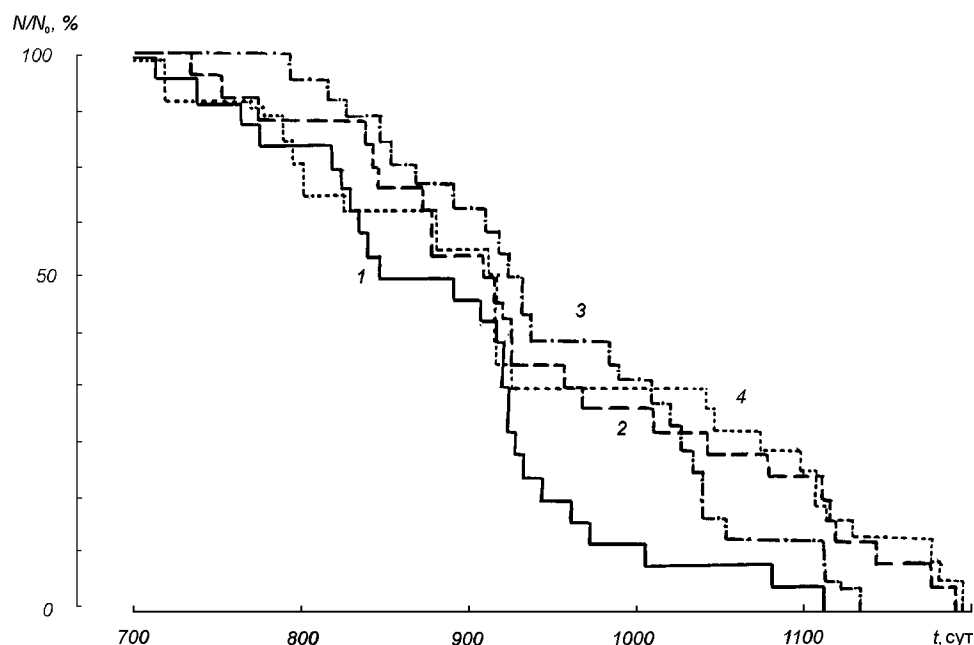


Рис. 1. Выживаемость N/N_0 самцов крыс линии Вистар: 1 — интактные животные, 2 — при калорийно-ограниченном рационе, 3 — KOP в сочетании с аэросилом, 4 — KOP в сочетании с хлорамфениколом

существует отчетливая обратная зависимость между толерантностью к ГГ и массой тела. Как пороговые величины ГГ, опасные для жизни, так и LD50 и летальные ГГ-нагрузки закономерно уменьшались в ряду дрозофила-мышь-крыса. Если у дрозофил опасные для выживания ГГ измерялись тысячами g, то у мышей сублетальные величины находилась в диапазоне 25–30g, а у крыс — 10–15g (Frolkis et al., 1995). Следует отметить, что хотя крыса и человек существенно отличаются по массе тела, по толерантности к ГГ-нагрузкам они обнаруживают парадоксальное сходство (нагрузки до 10g считаются верхним пределом допустимости и в профессиональной деятельности человека). Существует целый ряд и других соображений, позволяющих допустить, что из доступных нам объектов исследований крысы являются наиболее удобными и «приближенными» к человеку. Поэтому объектом наших последующих поисков гравипротекторов в основном были взрослые самцы крыс линии Вистар. Что касается выбора наиболее эффективных гравипротекторов, то для нас естественным было решение прежде всего обратиться к хорошо известному классу препаратов — геропротекторам (от греческих слов герат — старение и протектор — защита). Собственно сам термин «гравипротектор» возник по аналогии с «геропротектором», хотя мы убеждены, что сходство здесь не только терминологическое. Принципы отбора и ме-

ханизмы действия геро- и гравипротекторов до определенной степени совпадают: оба направлены на повышение резервных возможностей и сопротивляемости организма к неблагоприятным воздействиям окружающей и внутренней среды; оба затрагивают основные системы жизнеобеспечения от молекулярного уровня до уровня целостного организма. Вместе с тем не следует переоценивать сходство между этими классами воздействий. Мы полагаем, что несмотря на определенное сходство, геропротекторы и гравипротекторы представляют собой достаточно самостоятельные классы воздействий, которые имеют определенные сегменты «перекрывания», т. е. общих для воздействий обоого типа детерминантов и «каналов» реализации входных сигналов. С этих позиций поиск наиболее эффективных гравипротекторов среди геропротекторов, очевидно, сводится к выбору воздействий, имеющих наибольший сегмент «перекрывания» и общих «каналов».

На основании имеющихся к настоящему времени данных можно заключить, что отклонения силы гравитации в обе стороны от гравитации Земли (как ГГ, так и МГ) приводят к примерно однотипным и преимущественно отрицательным изменениям, которые в итоге вызывают рост базального метаболизма, синдромы ускоренного или преждевременного старения и сокращение ПЖ. И если такие изменения при ГГ действительно соответ-

вуют общим представлениям, то повышение метаболизма в условиях МГ многие считают временным явлением, которое должно быть характерно только для периода приспособления и должно исчезнуть после полного завершения этапа адаптации к невесомости. В этой связи интересны данные о том, что у дрозофил, родившихся на борту биоспутника, в отличие от мух, которые впервые оказались в невесомости в более зрелом возрасте, признаки «стресса невесомости» менее выражены или отсутствуют, а их ПЖ практически не отличается от аналогичных показателей, характерных для контрольных мух (Miquel, Souza, 1991). По всей вероятности, родившиеся в условиях невесомости особи имеют больше шансов безболезненно и быстро завершить период адаптации, тем самым избегая повышения интенсивности метаболизма и сокращения ПЖ. Если аналогичные закономерности окажутся справедливыми и для млекопитающих, то, как отмечалось выше, их энергетические затраты могут оказаться на 1/3 ниже нормы, что соответствует оптимальным КОР, обычно приводящим к замедлению старения и увеличению ПЖ примерно на ту же одну треть (Фролькис, Мурадян, 1978).

Эти и ряд других соображений послужили основанием для выбора первой испытанной нами гравипротекторной модели — КОР. Выбор этой модели был обусловлен также тем, что в настоящее время именно она считается наиболее надежным и мощным геропротектором для млекопитающих. Более того, такая схема КОР приводила к существенному продлению жизни и в опытах, начатых в зрелом возрасте (Мурадян, Жеребицкая, 1993). Причем в ряде случаев пролонгирующий эффект удавалось усилить с помощью комбинации КОР с другими геропротекторными воздействиями (рис. 1). Кроме того, важным для нас моментом было то, что при КОР, как показали наши опыты с использованием радиоактивных предшественников РНК и белка (^{14}C -оротата и ^3H -лейцина соответственно), снижается интенсивность биосинтетических процессов в тканях ЦНС и миокарде (рис. 2). Это может быть существенным моментом, так как известно, что интенсивность метаболизма именно в тканях ЦНС и миокарда считается «лимитирующим» фактором выживания крыс при краткосрочной ГГ. Следовательно, если показатели интенсивности биосинтеза белка коррелируют с интенсивностью метаболизма, то можно было надеяться, что животные, содержащиеся на КОР, могли легче переносить острую гипоксию, которая, по-видимому, является основной причиной их гибели при сеансе ГГ. Для выяснения этого вопроса нами были использованы взрослые крысы, которые за

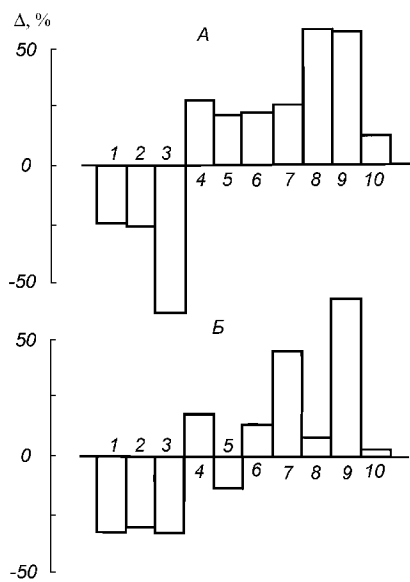


Рис 2. Отличия Δ интенсивности биосинтеза для крыс, получавших калорийно-ограниченный рацион, по сравнению с интактными крысами: А — для суммарной РНК, Б — для белка в разных тканях; 1 — лобная кора, 2 — гипоталамус, 3 — скелетная мышца, 4 — миокард, 5 — гипофиз, 6 — щитовидная железа, 7 — кора надпочечников, 8 — эпителий кишечника, 9 — почки, 10 — печень

полгода до опытов были переведены на 50-% КОР. Динамика интенсивности выделения углекислого газа при нагрузке 10 g у подопытных и интактных животных мало отличались. При этом в обеих группах выживали все животные, а уровень газообмена после роста, вызванного ГГ стрессом, возвращался до исходного уровня примерно через 1 час. Однако при увеличении ГГ до 25g отличия в толерантности к ГГ становились очевидными. В группе крыс с КОР выживаемость была вдвое выше (50 %), чем в группе контрольных животных (25 %). Интенсивность газообмена в обеих группах при этом мало изменялась (рис. 3). Следует отметить, что в этой серии опытов не удалось обнаружить сколь-нибудь отчетливой зависимости между массой тела и вероятностью выжить при ГГ-стрессе летальной силы. Так, средние значения массы тела выживших и погибших животных практически не отличались ни в группе интактных (294 ± 5 и 295 ± 10 г), ни в группе крыс, переведенных на КОР (283 ± 9 и 289 ± 17 г).

Таким образом, использованное нами геропротекторное воздействие — КОР — одновременно оказалось эффективным гравипротектором, что не должно казаться полной неожиданностью, учитывая приведенные выше соображения о возможных

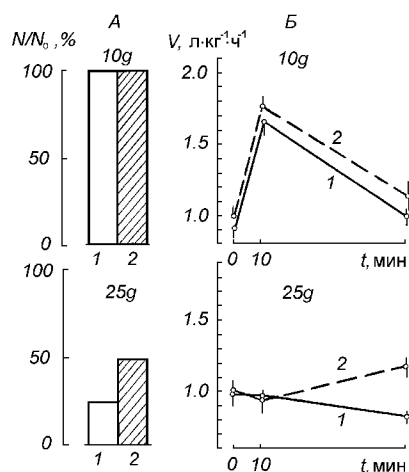


Рис. 3. Выживаемость N/N_0 и выделение углекислого газа V у интактных (1) и переведенных на калорийно-ограниченный рацион (2) крыс до и после гипергравитационного стресса силой 10g и 25g

механизмах действия геро- и гравипротекторов. Вместе с тем совершенно ясно, что это лишь первое испытанное средство и не следует спешить с обобщающими заключениями. Более того, наиболее вероятно, что далеко не все геропротекторы будут сочетать эти два качества, но и в таком случае понимание причин сочетанного или раздельного потенциалов геро- и гравипротекторов может быть полезным как для геронтологии, так и биологии гравитационных факторов. Для нас важно то, что несмотря на все трудности развития науки сегодняшнего дня нам удалось создать скромную, но вполне функциональную материально-техническую базу, разработать свои специфические подходы к изучению таких важных с теоретической и прикладной точек зрения средств, как гравипротекторы. Хотелось также подчеркнуть, что настоящая работа во многом носит проблемно-обзорный характер. Она выполнена на «стыке» таких перспективных, направленных в будущее наук, как геронтология и космическая биология и по-существу является первой из серии планируемых нами публикаций о влиянии факторов космических полетов на старение и ПЖ, о поиске средств защиты от наиболее неблагоприятных из них. Мы полагаем, что эффективными в этом отношении средствами могли бы стать как препараты, способные оптимизировать физиологические параметры регуляции на уровне отдельных «ключевых» тканей и организма в целом, так и молекулярно-биологические подходы и средства, обеспечивающие целенаправленную

модуляцию экспрессии, репарации и стабильности генома, в частности с помощью ингибиторов прямой и обратной транскрипции.

Работы выполнены при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины.

- Мурадян Х. К., Шинкарь (Жеребицкая) Е. И. Влияние ограниченного по калорийности рациона на циркадный ритм газообмена и теплопродукции у старых крыс // Вопросы питания.—1993.—№ 3.—С. 33—36.
- Фролькис В. В., Мурадян Х. К. Экспериментальные пути продления жизни. — Л.: Наука, 1978.—248 с.
- Фролькис В. В., Мурадян Х. К. Старение, эволюция и продление жизни. — Киев: Наук. думка, 1992.—344 с.
- Charles J. B., Bungo M. W. Cardiovascular physiology in space flight // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 163—168.
- Cristofalo V. J. On understanding the biology of aging: studies in space // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 137—138.
- Criswell-Hudak S. B. Immune response during the space flight // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 289—298.
- Cziesler Ch. A., Chiasera A. J., Duffi J. F. Research on sleep, circadian rhythms and aging: application to manned spaceflight // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 217—232.
- Economos A. C., Miquel J., Ballard R. W., et al. Effects of stimulated increased gravity on the rate of aging of rats: implications for the rate of living theory of aging // Arch. Gerontol. and Geriatr.—1983.—1.—P. 349—363.
- Frolkis V. V., Muradian Kh. K. Life Span Prolongation. — Boca Raton: CRC-Press, 1991.—445 p.
- Frolkis V. V., Muradian Kh. K., Timchenko A. N. Hypergravity stress: species- and age-peculiarities of oxygen consumption, thermoregulation, and survival // III European Congress of Gerontology: Abstracts (Amsterdam, 30 August—2 September, 1995). — Amsterdam, 1995.—N 086.0078.
- Hughes-Fulford M. Altered cell function in microgravity // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 247—256.
- Hymer W. C., Grindeland R. E. The pituitary: aging and spaceflown rats // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 257—266.
- Kleiber M. The Fire of Life. — New York: Wiley,—1961.
- Nicogossian A. E., Yuntoon C. L., Pool S. L. Space Physiology and Medicine. — Philadelphia: Lea & Febiger, 1989.—478 p.
- Schultheis L. The mechanical control system of bone in weightless spaceflight and in aging // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 203—214.
- Smith J. J., Porth C. J. Posture and the circulation: the age effects // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2/3.—P. 141—162.

GEROPROTECTORS AS GRAVIPROTECTORS?

V. V. Frol'kis, Kh. K. Muradian, A. N. Timchenko,
E. I. Zhrebitskaia, and A. A. Limareva

Principal gerontological problems in space biology are discussed with special emphasis the effects of gravity factors on aging pattern and life span of laboratory insects and rodents. Probable approaches and experimental designs are analyzed for the search of graviprotectors — means aimed to abate harmful effects of micro- and hypergravity. Data on the possibility of using calorie-restricted diets and other geroprotectors as a means for upgrading the tolerance to hypergravity stress are presented.

УДК 581.17:581.84

Гравічутлива протонема моху — модельний об'єкт космічної біології

О. Т. Демків, Я. Д. Хоркавців, О. Р. Кардаш, Х. І. Чабан

Інститут екології Карпат НАН України, Львів

Надійшла до редакції 07.03.97

Поряд із статочитами коренів і пагонів квіткових рослин, гравічутливими виявилися нитчасті структури з полярним ростом, у яких легко спостерігати за ростовими рухами і седиментацією амілопластів *in vivo* і тому стало можливим дослідження їх у деталях. В умовах гравітаційного поля Землі протонема мохів *Ceratodon purpureus* і *Pottia intermedia* на світлі росте по поверхні субстрату, а в темряві орієнтується негативно гравітропно. Сприйняття граві- і фотостимулів, як і диференційований ріст, зосереджені у верхівці апікальної клітини. Реакція протонеми на бокове світло залежить як від якості, так і від інтенсивності світла. Низькі інтенсивності світла зумовлюють позитивний фототропний ріст, високі — негативний. Крім граві- та фототропізму, для протонеми властивий автотропізм, який протидіє зміні напрямку росту, а також відновлює його після припинення дії збудовуючого фактора. Тому що сприйняття і реалізація гравістимулу відбуваються в одній і тій же апікальній клітині столону і не ускладнені ланцюгом проміжних сигнальних систем, була встановлена каузальність гравітропної реакції від кількості й розподілу амілопластів, а також вплив кліностатування на їх формування. Дослідження, які плануються здійснити на космічному кораблі «Колумбія», дадуть можливість перевірити правильність такого припущення.

В епоху науково-технічного прогресу значно зросла зацікавленість до інформації про рівні та діапазон чутливості живих систем до мінливості геофізичних факторів, вплив яких може істотно відрізнятись від звичайних умов життєдіяльності рослин. Крім того, значно розширилися експериментальні можливості досліджень реакцій рослин на дію геофізичних факторів.

Специфіка умов автономних космічних польотів дає можливість конструювати відмінні від земних системи екзогенних факторів та аналізувати їх інтегральний вплив в умовах мікрогравітації (Сытник и др., 1984), які неможливо відтворити на Землі.

Гравітація завжди була невід'ємним компонентом довкілля, вона супроводжувала еволюцію живих систем і тому залишила глибокий слід у різних проявах їх життєдіяльності й формуванні структур. Серед розмаїття об'єктів дослідження гравітропних

реакцій рослин набули визнання як квіткові рослини, так і безсудинні організми (Sack, 1991). У квіткових рослин гравічутливими є не всі клітини, а лише статочити коренів і пагонів (Sievers et al., 1996). У безсудинних, представлених різними систематичними групами — від водоростей (*Chara*), до мохо- та папоротеподібних, гравічутливими є верхівкові клітини нитчастих структур. Апікальні клітини ризоїдів *Chara* і протонеми мохів сприймають і реалізують гравістимул, як і інші стимули, у межах верхівки ростучої клітини (Sack, 1993; Чабан, 1996). Принцип дії гравістимулу в обох групах рослин однотипний і реалізується за участю статолітів, седиментація яких під впливом гравітації створює асиметричний їх розподіл, на що клітина реагує просторовою зміною ростової активності. Однак у водорості *Chara* функцію статолітів виконують кристали барію, а в протонемі мохів — амілопласти. Характер реакції також різний: у



Рис. 1. Програма космічного експерименту на американському космічному кораблі «Колумбія»: 1 — контроль (7 днів темряви) — фіксація; 2 — 7 днів темряви + 4 год ЧС — фіксація; 3 — 7 днів темряви + 4 год ЧС + 2 год темряви — фіксація; 4 — 7 днів темряви + 4 год ЧС + 24 год темряви — фіксація

Chara спостерігається позитивна гравітропна реакція ризоїдів, а в протонемі — негативна гравітропна реакція зеленої фотосинтезуючої протонемі.

Негативний гравітропізм протонема проявляє тільки у темряві, на світлі вона росте по поверхні субстрату (Demkiv et al., 1996). У зв'язку з цим метою роботи було дослідити кінетику ростових рухів (тропізмів) протонемі мохів в умовах гравітаційного поля Землі та в умовах мікрогравітації і на цій основі визначити внесок кожного із стимулів у загальний процес ростових рухів і природу їх взаємодії.

У роботі використано два види мохів: *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. та *Pottia intermedia* (Turn.) Fűrnr. Вид *C. purpureus* широко застосовується при дослідженнях механізмів гравітропізму (Hartmann, 1984; Lamparter et al., 1995; Sack, 1993; Walker, Sack, 1990), у той час як *P. intermedia* вивчена значно слабше (Чабан, 1996). *P. intermedia* в основному застосовувалася для досліджень механізмів морфогенезу, в тому числі переходу гаметофітного шляху розвитку на спорофітний (Рипецкий, 1985).

Для досліджень ростових рухів використовували ювенільну стадію мохів — протонему, яку вирощували зі спор на агаризованому середовищі Кноп П з мікроелементами (Kofler, 1967), у контрольованих умовах освітлення (2.0—2.2 тис. лк), температури (20—22 °C) і вологості (80—95 %). Джерелом білого світла були лампи денного світла ЛБ-30, синього та зеленого — ртутно-кварцева лампа СВД-120А, із фільтрами СС-15 та ЗС-11. Джерелом червоного світла служили світлові діоди LED - E₁₈₄. 7-денну протонему знімали з агару і переносили у чашки зі свіжим середовищем, у яке додатково вносили 0.2 % глюкози. Чашки поміщали у

непрозорі контейнери (BRIC) таким чином, щоб надати їм вертикального положення.

Американські інженери розробили унікальну систему освітлення кожної окремої чашки: у бокову стінку BRIC (контейнера для вирощування рослин у темряві) вмонтовані світлові діоди LED-E₁₈₄, які випромінюють червоне світло (ЧС) з довжиною хвилі 660 нм та інтенсивністю до 3.0 Вт/см². Таке джерело бокового світла створює крутий градієнт освітленості. Протонему *C. purpureus*, що росла гравітропно у темряві, насвітлювали 4 год боковим ЧС згідно з розробленою програмою (рис. 1) і аналізували її ріст під впливом світла й темряви після насвітлення. Після 7-денного росту протонемі у темряві першу групу чашок (по три кожного виду) фіксували, і вони служили темновим контролем. Другу насвітлювали 4 год ЧС і відразу фіксували. Третю теж насвітлювали 4 год ЧС, після чого витримували 2 год у темряві й фіксували. Останню (четверту) групу чашок фіксували після 24-годинного витримання у темряві і 4 год насвітлення. Префіксацію протонемі проводили сумішню 1 %-го формаліну і 2.5 %-го глютаральдегіду на фосфатному буфері (pH 7.2), після того 2 %-м розчином OsO₄ на тому ж буфері при температурі 4 °C (Сытник и др., 1984).

У темряві в умовах гравітації протонема обох видів проявляє негативний гравітропізм і тому всі нитки орієнтувалися паралельно і росли вверх (негативно гравітропно). За 7 днів при середній швидкості росту 28.3±0.3 мкм/год протонема *C. purpureus* видовжувалася на 3.5—5.5 мм, а протонема *P. intermedia*, швидкість росту якої 19.3 ± 0.2 мкм/год, дещо менше — 2.7—3.5 мм. Було встановлено, що протонема *P. intermedia* реагує позитивно фототропно на бокове світло з усіх ділянок спектру (Demkiv et al., 1996). Бокове світло

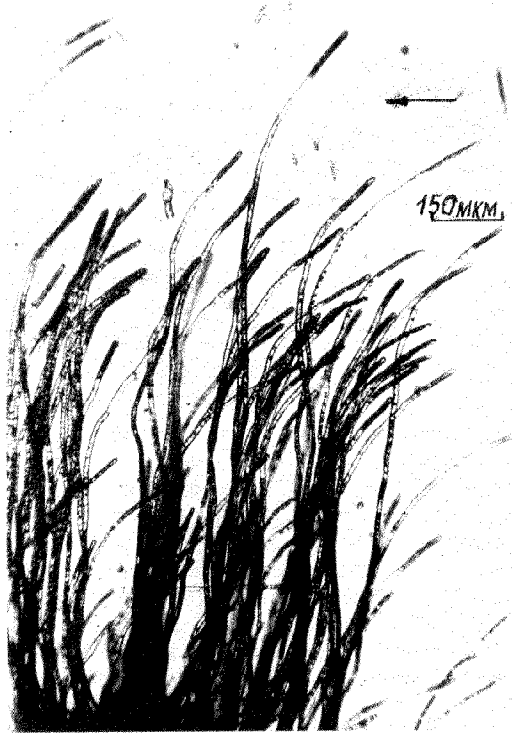


Рис. 2. Позитивний фототропізм (на синє світло) верхівок апікальних клітин *Pottia intermedia*, що росла 7 днів негативно гравітропно у темряві. Тут і далі стрілкою позначена орієнтація світла

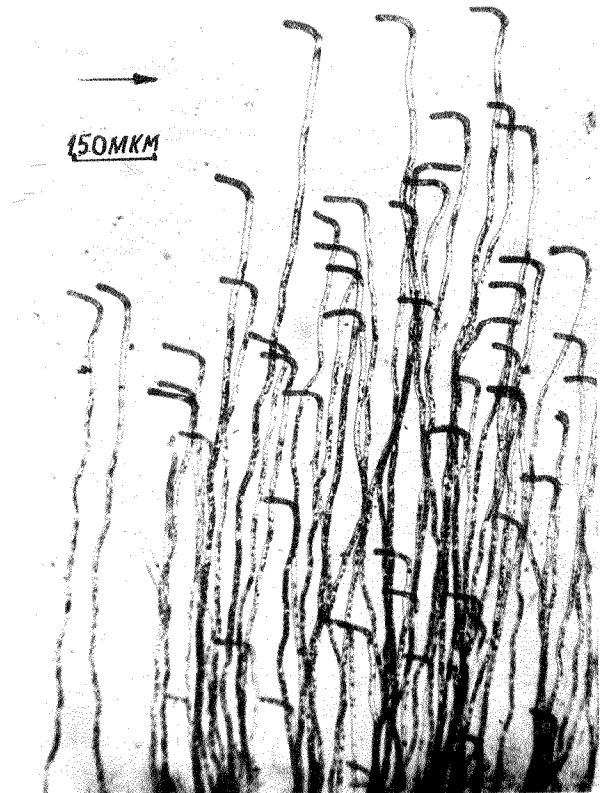


Рис. 3. Реакція протонемі *Ceratodon purpureus*, що росла 7 днів негативно гравітропно у темряві, на 4 годинне бокове ЧС

викликало поступове викривлення верхівок протонемі і фототропно позитивний ріст у напрямку до джерела світла (рис. 2).

На червоному світлі характер згину якісно відрізнявся від синього різким згином верхівки до джерела світла (рис. 3).

Крім довжини хвилі, на характер реакції істотно впливає інтенсивність освітлення. З допомогою BRIC можна дослідити і цю особливість впливу світла. Інтенсивність свідчення діодів LED експоненційно збільшувалась з напругою від 0.2 Вт/м² при напрузі 13 В до 3.0 Вт/м² при 15 В. Інтенсивність бокового свідчення істотно впливала на фототропні реакції протонемі *P. intermedia*. Високі інтенсивності світла (2.5–3.0 Вт/м²) викликали однозначну негативно фототропну реакцію (рис. 4), яка мало змінювалася з віддаллю від джерела світла. Зниження інтенсивності світла до

0.9 Вт/м² викликало неоднозначну реакцію — частина стонів росла до світла (позитивно фототропно), а інша — від світла (негативно фототропно). Із віддаллю від джерела світла збільшувалась кількість стонів, які орієнтувалися до світла, але одночасно з цим зменшувалися кути загину.

В умовах низької інтенсивності світла (0.2 Вт/м² при 13 В) для протонемі *P. intermedia* ми одержали тільки позитивну фототропну реакцію, хоча з віддаленням від джерела світла ця реакція ставала менш вираженою. Згладження фототропної реакції з віддаленням від джерела світла, очевидно, зв'язане з розсіюванням червоного світла в агарі. Кількісно ця реакція не залежала від орієнтації світла і тому реакція на світло, орієнтоване зверху чи знизу, відрізнялася тільки знаком, за абсолютним значенням кути згину істотно не відрізнялися (Demkiv et al., 1996).

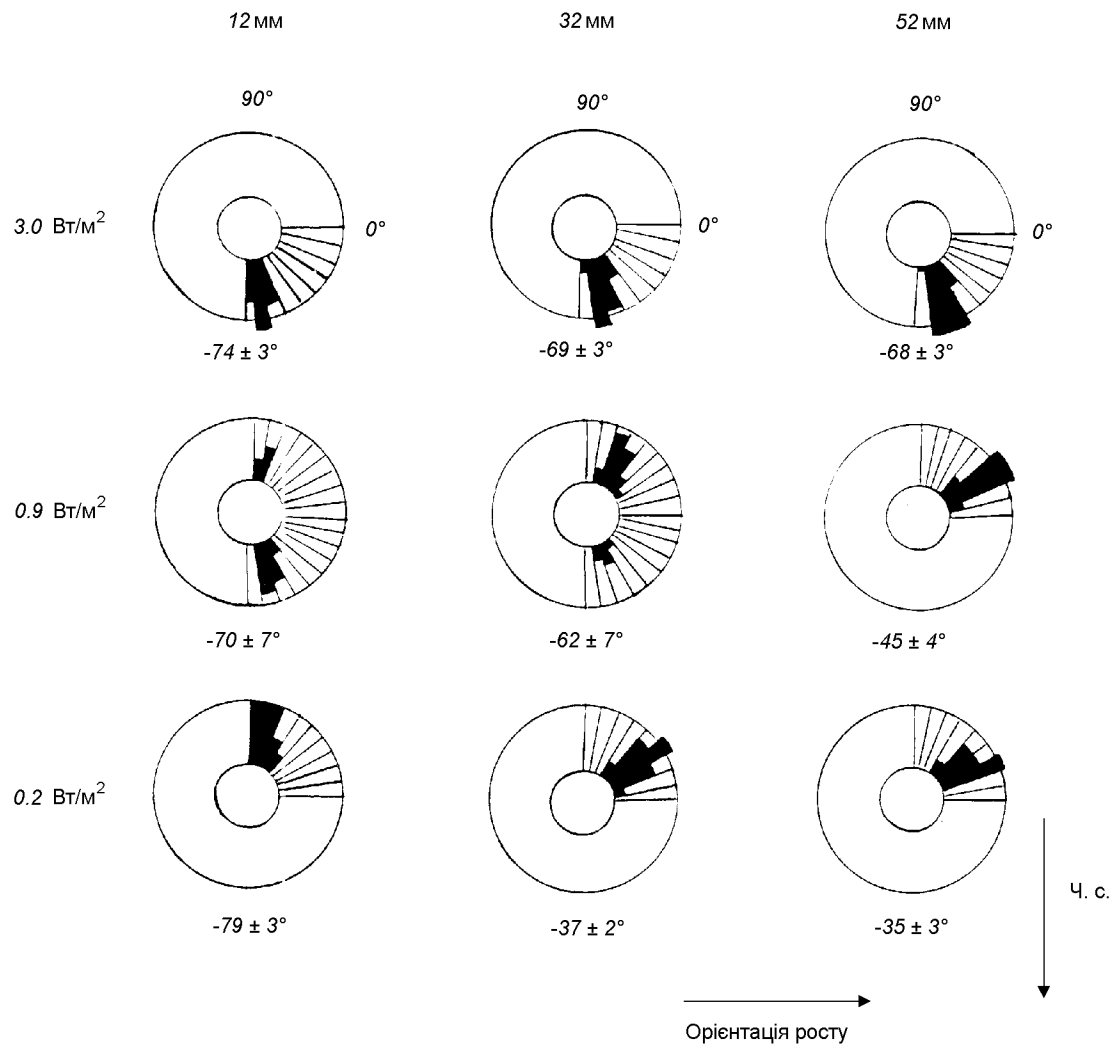


Рис. 4. Схема зміни кутів фототропного згину протонеми *S. purpureus* в залежності від інтенсивності освітлення (0.2, 0.9, 3.0 Вт/м²) та віддалі до джерела світла (12, 32, 52 мм)

Якісно відмінна реакція протонеми на ЧС послужила причиною пошуку механізмів дії ЧС і причетності до неї фітохромної системи реакцій червоного — далекого червоного світла. У темряві після наświetлення протонема продовжувала рости, але не у напрямі до джерела світла; верхівка апікальної клітини скривлялася, відновлюючи напрямку росту протонеми, який був до її наświetлення ЧС. Відновлення напрямку росту (автотропізм) чітко проявлялося лише після наświetлення протонеми ЧС (рис. 5). Така післясвітлова реорієнтація росту протонеми відбувалася дуже швидко. Не виключено, що і різка реакція протонеми на світло, і післясвітлове відновлення напрямку росту зв'язані з цис-транс-ізомеризацією фітохром. Вважають,

що під дією червоного світла відбувається деградація внутрішньоклітинних градієнтів активного фітохром (Lamparter et al., 1995). У темряві градієнт активного фітохром швидко відновлюється, що й призводить до зміни напрямку росту протонеми. Цей процес відбувався протягом 10—15 хв (Lamparter et al., 1995). Однак це не кінцевий напрям росту протонеми у темряві після наświetлення її ЧС. Через 8—10 годин протонема знову змінювала напрямок росту, орієнтуючись негативно гравітропно (рис. 6).

Складні ростові рухи протонеми у темряві після її наświetлення боковим червоним світлом в умовах гравітаційного поля Землі спричинили необхідність аналізу цього явища в умовах мікрогравітації.



Рис. 5. Відновлення орієнтації росту протонеми *C. purpureus*, що росла 7 днів у темряві і 4 год на ЧС

На підставі проведених досліджень було зроблено висновок про те, що орієнтація росту протонеми контролюється декількома різними стимулами: граві-, фото- і автостимулом. Загин протонеми в темряві вверх, тобто негативно гравітропно, відбувався поступово, що може свідчити про співучасть хоча би двох стимулів — граві- і автостимулу. На синьому світлі також спостерігалось поступове викривлення ниток до джерела світла, тобто і тут чітко проявляється взаємодія щонайменше двох стимулів — фото- і автостимулу. На червоному світлі не проявлялася дія ні авто-, ні гравістимулу, що може свідчити про блокування ЧС як граві-, так і автостимулу.

Таким чином, досліджуючи взаємодію фото- і гравістимулу, ми зіткнулися ще з одним стимулом, який, як правило, залишався поза увагою дослідників, хоча саме він виконував функцію внутрішньоклітинного регулятора, який не тільки запобігав зміні просторового статусу організму, але й відновлював його після виключення збуджуючого фактора. Як ця кібернетична система з негативним зворотним зв'язком працюватиме в умовах мікрогравітації, вдасться виявити тільки після завершення спільного українсько-американського експерименту «Shuttle'97».

У клітинах протонеми гравітропні реакції тісно зв'язані з формуванням, розподілом і седиментацією амілопластів (Young, Sack, 1992; Sievers et al., 1996). На світлі гравітропізм протонеми не проявляється і це явище тісно скорельоване із

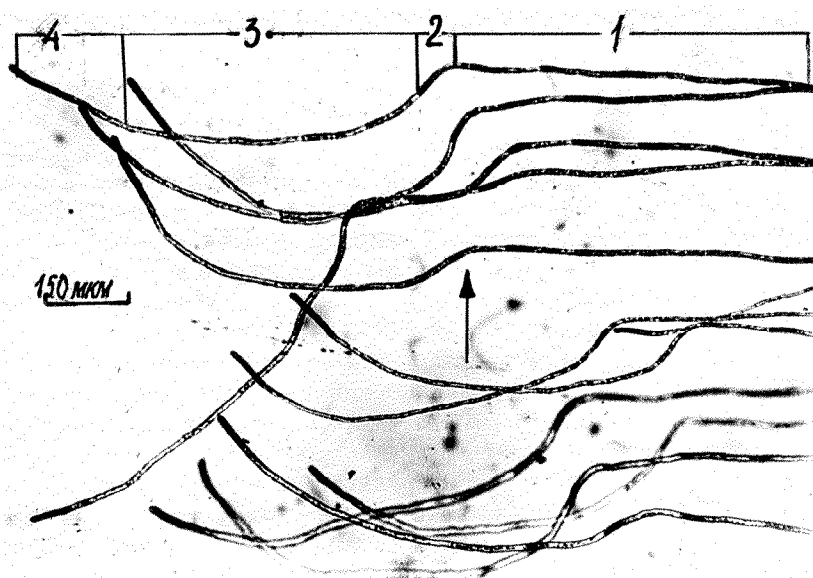


Рис. 6. Послідовний прояв авто- і гравітропізму у темряві (44 год) після 4 год наświetлення ЧС протонеми *C. purpureus*: 1 — гравітропний ріст у темряві; 2 — позитивний фототропний ріст до ЧС; 3 — автотропний ріст; 4 — гравітропний ріст

Вплив світла й горизонтального клиностаування на вміст амілопластів в апікальних клітинах протонеми *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.

Умови вирощування	Кількість проаналізованих клітин	Кількість амілопластів в апікальних клітинах
Темрява	79	60.5±5.1
Біле світло (2.0 тис. лк)	67	13.4±1.6
Червоне світло (0.9 Вт/м ²)	91	17.9±2.0
Клиностаування	56	37.2±4.0

зменшенням вмісту і величини амілопластів в апікальних клітинах протонеми *C. purpureus* (таблиця). Однак виявилось, що й горизонтальне клиностаування протонеми у темряві також призводить до істотного зниження вмісту амілопластів у апікальних клітинах. Експерименти, які планується провести на космічному кораблі «Колумбія», дозволять перевірити наявність тісного взаємного зв'язку амілопластів й гравітропізму у рослин. Крім цього, ми сподіваємося одержати інформацію про природу структурно-функціональних процесів, які супроводжують ростові рухи, і в першу чергу про зміну форми та розподілу органел, безпосередньо причетних до ростових рухів протонеми. Новим недослідженим явищем, і не тільки для нитчастих структур з полярним ростом, залишається реорієнтація росту (автотропізм) та механізми її реалізації.

- Рипецкий Р. Т. Экспериментальный апомиксис у мхов и проблема устойчивости детерминированного и дифференцированного состояния // Онтогенез.—1985.—16, № 3.—С. 229—241.
- Сытник К. М., Кордюм Е. Л., Недуха Е. М. и др. Растительная клетка при изменении геофизических факторов. — К.: Наук. думка, 1984.—136 с.
- Чабан Х. І. Структурно-функціональна організація апікальної клітини протонеми *Pottia intermedia* в умовах гравістимуляції: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — Київ, 1996.—20 с.
- Demkiv O. T., Kordyum E. L., Khorkavtsiv Ya. D., Chaban Ch. I. Gravitropism and photostimulus in moss protonema growth movements // Abstracts 31st Sci. Ass. Cospar (14—21 July, 1996), Birmingham, England.—1996.—P. 314.

- Hartmann E. Influence of light on phototropic bending of moss protonemata of *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. // J. Hattori Bot. Lab.—1984, N 55.—P. 87—98.
- Kofler L. Polarisation et geotropisme des spores de *Funaria hygrometrica* en presence d'hydrate de chloral // Bull. de la societe Botanique de France.—1967.—S. 138—150.
- Lamparter T., Podlowski S., Mittmann F. et al. Phytochrome from protonemal tissue of the moss *Ceratodon purpureus* // J. Plant Physiol.—1995.—47, N 3.—P. 243—256.
- Sack F. D. Plant gravity sensing // Inter. review of cytology.—1991.—127.—P. 193—252.
- Sack F. D. Gravitropism in protonema of the moss *Ceratodon* // Mem. Tarrey Bot. Club.—1993.—25, N 1.—P. 36—44.
- Sievers A., Buchen B., Hodick D. Gravity sensing in tip-growing cells // Plant Cell.—1996.—1, N 8.—P. 273—279.
- Walker L. M., Sack F. D. Amyloplasts as possible statoliths in gravitropic protonemata of the moss *Ceratodon purpureus* // Planta.—1990.—181, N 1.—P. 71—77.
- Young J. C., Sack F. D. Time-lapse analysis of gravitropism in *Ceratodon* protonemata // Amer. J. Bot.—1992.—79, N 12.—P. 1348—1358.

GRAVITY SENSITIVE MOSS PROTONEMA — A MODEL OBJECT OF THE SPACE BIOLOGY

O. T. Demkiv, Ya. D. Khorkavtsiv,
O. R. Kardash, and Kh. I. Chaban

In addition to the statocytes of roots and shoots, a number of tip-growing cells are also sensitive gravity, which affects cell growth and development. Since these tip-growing cells are highly suitable for observations in vivo, the movement and sedimentation of their statoliths can be studied in detail. Protonemata of the moss *Ceratodon purpureus* and *Pottia intermedia* were the object of the investigation of growth kinetics. The moss protonemata grown along the surface of nutrient-supplemented media in the light, and dark-grown moss protonemata were negatively gravitropic. Both gravitropic sensing and differential growth (curvature) occur in or close to the tip of the apical cell, and the tip growth is closely linked to tip orientation. The protonemata reaction on the lateral illumination depended on the quality as well as the quantity of light. The low-intensity light induced a positive phototropism of the protonemata, the high-intensity light produced a negative gravitropic growth. Besides the photo- and gravitropism of the moss protonema, the autotropism was established as an ability of protonema tip to renew the original growth direction and orientation in space after the factor inducing the tropism ceases to act. It was established experimentally that the protonema growth movements are controlled by a few stimuli at the same time, and it was suggested that disappearance even of one of them might reflect on the growth movement character. The experiments which we plan to realize during the Shuttle-97 experiment will enable us to examine the validity of this hypothesis.

УДК. 551.46.581.19

Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань

В. І. Лялько¹, О. Д. Федоровський¹, Л. Я. Сіренко²,
О. Д. Рябоконенко¹, Ю. В. Костюченко¹, В. Г. Якимчук¹

¹ Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

² Інститут гідробіології НАН України, Київ

Надійшла до редакції 28.01.97

Виконано огляд прикладів практичного використання космічної інформації при розв'язанні різних водогосподарських і водоохоронних завдань. Проаналізовані спектральні інформативні ознаки для дистанційної оцінки стану водного середовища. На прикладі водних об'єктів України запропоновані основні принципи дешифрування космічних знімків.

Для вирішення актуальних завдань раціонального й екологічно обгрунтованого водокористування необхідно застосовувати сучасні засоби отримання оперативної інформації про стан водних систем країни. Систематичне одержання такої інформації традиційними методами вимагає значних витрат, а іноді взагалі неможливе. Досвід експлуатації природоресурсних штучних супутників Землі свідчить про перспективність та ефективність застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Підтвердженням цього є Державна космічна програма України та запуск супутника «Січ-1».

Сучасний рівень розвитку аерокосмічних засобів ДЗЗ дозволяє отримати дані не лише про фотометричні параметри водних об'єктів в широкому спектральному діапазоні з необхідним просторовим розділенням і періодичністю поновлення інформації, але й оцінювати низку їх санітарно-біологічних характеристик. Водна поверхня при цьому є природним джерелом інформації для визначення як стану водойми в цілому, так і виявлення ряду процесів, що відбуваються у товщі води. Вважається, що найкращих результатів можна досягти при комплексному, синхронному використанні кос-

мічних та наземних досліджень, коли дані наземних вимірювань екстраполюються на картосхеми, одержані на основі космічних знімків. Ця інформація є основою побудови алгоритмів цифрової обробки і дешифрування космічних знімків.

В успішному здійсненні робіт першочергове значення має з'ясування тематичних завдань водокористування, що мають практичну цінність для потенційного користувача, і які можуть бути розв'язані за допомогою космічної інформації. На основі досвіду практичних робіт, накопиченого в цій галузі, сформулюємо деякі з цих завдань: інвентаризація і контроль гідрографічної й гідротехнічної мережі заплави річок в районах урбанізації; дослідження процесів ерозії та абразії берегів; визначення локалізації зон обміління, русел річок, заболочування гирла та заплави; оцінка еколого-санітарного стану водного середовища та якості води; виявлення місць поступання стічних вод (точкових та дифузних джерел забруднення) і контроль динаміки розповсюдження зависі по акваторії; визначення зон «цвітіння» та теплового забруднення водойм; контроль зон підтоплення та затоплення під час повені; визначення змін берего-

вої лінії та коливань рівня заповнення водоймищ; оцінка стану прибережних смуг, нерестилищ та продуктивності водойм тощо (Лялько, Федоровський, 1996).

Гідрографічна мережа заплави р. Дніпро (озера, стариці, протоки) відіграють важливу роль не тільки в формуванні ландшафту міста, утворенні зон рекреації для його населення, але й в забезпеченні функціонування гідротехнічної мережі регіону. Будівництво мостів, тунелів метро, комунікацій, доріг, наживи піску та інші великомасштабні роботи в поєднанні з неорганізованим рекреаційним навантаженням є причиною не лише ускладнення екологічної і санітарно-біологічної ситуації в місті, але й збільшення випадків підтоплення територій або їх осушення, а також інших несприятливих наслідків порушення гідрографічної мережі регіону. Відсутність необхідної інформації і належного моніторингу за водними об'єктами даного типу не дозволяє упорядкувати їх використання і розробити екологічно безпечні нормативи їх змін. В розв'язанні цього завдання чималу допомогу може надати застосування космічних методів ДЗЗ. Вивчення і обробка космічних знімків, в сукупності з проведенням цілеспрямованих контрольних наземних вимірювань і оцінок екологічного стану водних об'єктів відображає ретроспективу процесів, що відбуваються, й може дати не тільки динаміку змін, але й дозволить оцінити сучасний екологічний стан водних об'єктів.

Морфологічні та морфометричні характеристики водойм знаходять найбільш чітке відображення на космічних знімках в спектральній області $\lambda\lambda$ 0.7—1.1 мкм. До них відносяться форма та площа акваторії, наявність островів, великих акумулятивних утворень. Заключним етапом використання космічної інформації є складання відповідних тематичних картосхем та цифрових комп'ютеризованих зображень регіону, який досліджується, розробка рекомендацій щодо оздоровлення ситуації та екологічно безпечного використання водних об'єктів. Порівняльний аналіз даних, одержаних за різні роки, дозволяє оцінити динаміку процесів підтоплення та осушення, виявити негативні зміни, що виникли під впливом антропогенних дій і розробити шляхи їх профілактики та усунення. Наприклад, зіставлення космічного знімку (рис. 1, ШСЗ SPOT, 07.06.1995 р.), що відображає гідрографічну ситуацію заплавної ділянки р. Дніпро в зоні Києва, з картою 1912 р. свідчить про те, що за цей час в заплаві зникло багато озер, стариць, змінилися контури островів, відбулось випрямлення русла р. Десни на окремих її ділянках, але, найголовніше, порушився зв'язок заплави Дніпра з

руслом основної річки. Незважаючи на те, що будівництво водосховищ за рахунок акумуляції весняного стоку зробило Дніпро більш повноводним, здійснено серйозний крок до ліквідації заплави — природних «легень» і зони самоочищення річки, тобто до погіршення її санітарно-біологічного стану.

Інформація про концентрацію і просторовий розподіл забруднень у водному середовищі становить значний інтерес для служб водоохорони, водокористування та експлуатації водосховищ. Контроль транспортування зависей, крім санітарно-біологічного значення, важливий також при вивченні динаміки процесів переробки берегів, переформування мілин і зон акумуляції зависей. Аналіз ряду публікацій (Кондратьев и др., 1988, 1996; Bukato et al., 1981; Lathorp et al., 1991) свідчить про те, що для одержання такої інформації можна успішно використовувати багатозональні космічні знімки в оптичному діапазоні спектра.



Рис. 1. Гідрографічна сітка заплавної ділянки р. Дніпро у зоні Києва

До числа основних джерел забруднень водного середовища відносять викиди очисних споруд промислових і комунально-побутових підприємств, сільськогосподарські і дренажні стоки, судноплавство, гідротехнічні роботи (будівництво в прибережній зоні, налив ґрунту, поглиблення дна) та ін. Водна зависть за особливостями фізичного впливу на світловий потік розподіляється на розсіюючу неорганічну зависть (пісок, мінеральні частинки, детрит клітини безхлорофільних організмів) і поглинаючу зависть — фітопланктон і розчинна органічна речовина. Масштаби забруднень, їх вплив на екологічний стан водойм значною мірою залежать від гідродинамічних та гідрологічних характеристик водних об'єктів, що обумовлюють особливості процесів міграції та трансформації зависть різного типу.

Класифікація зон забруднень на космічних знімках виконується оператором-дешифрувальником за спектральною яскравістю і просторово-текстурними ознаками з комплексним використанням візуально-інструментальних і цифрових методів обробки інформації.

Для встановлення кореляційних зв'язків між спектральною яскравістю забрудненої водної поверхні, дистанційно заміряною в різних діапазонах спектра, і параметрами водного середовища, одержаними на контрольних станціях, використовують методи регресивного аналізу. Відомо, що коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ) водних мас, в яких присутня неорганічна зависть, плавно змінюється в спектральному інтервалі $\lambda\lambda$ 500—700 нм. Проте в цьому інтервалі КСЯ залежить як від концентрації фітопланктону, так і від неорганічної зависть, тоді як в інтервалі $\lambda\lambda$ 600—700 нм переважає вплив неорганічної зависть (Кондратьєв, Шумаков, 1990). В каламутній воді з крупнодисперсною завистю (0.05—0.15 мм і більше) максимум відбиття припадає на довжини хвиль більші ніж 700 нм, в той час, як від дрібнодисперсної зависть (0.0015—0.015 мм) відбиття рівномірне в усіх спектральних каналах оптичної апаратури. Найефективніше для виявлення чистої води використовувати спектральний діапазон 500—600 нм, в якому існує лінійна регресивна залежність між оптичною щільністю зображення і відносною прозорістю води. Дослідження результатів дешифрування космічних знімків, одержаних з використанням різних комбінацій спектральних каналів, дозволили зробити висновок про те, що для дистанційного вивчення стану водного середовища з підвищеною каламутністю найбільш інформативним є спектральний канал 636—670 нм (Феоктистов и др., 1994).

Спроби отримання простих алгоритмів для моні-

торингу забруднення континентальних водойм були здійснені багатьма авторами (Кондратьєв, Поздняков, 1985; Красовский и др., 1989; Камов, 1992). В роботі Bukato et al. (1995) проаналізовано вплив оптично активних компонент на вторинні гідрооптичні характеристики водного середовища, а саме на коефіцієнт дифузного відбиття. Показано, що одним із шляхів побудови алгоритмів визначення концентрації компонентів для акваторій внутрішніх водойм і морської прибережної зони є процедура багатовимірної оптимізації по Левенбергу—Марквардту. На третій тематичній конференції по застосуванню дистанційного зондування (вересень, 1995, Сіетл, США) в доповіді К. Я. Кондратьєва та ін, присвяченій проблемі оцінки відомих до цього часу алгоритмів, було показано, що використання для визначення концентрації компонентів регресивних рівнянь недостатньо ефективне. Ефективнішим є підхід з застосуванням функцій оцінки максимальної правдоподібності для визначення просторово-опосереднених значень концентрації досліджених компонент, в тому числі зависть.

Таким чином, аналіз опублікованих результатів досліджень залежності між параметрами водного середовища, яке містить зависть речовину в різних концентраціях і її спектральними характеристиками відбиття показали, що, хоч і існує між ними кореляційний зв'язок, ця залежність сильно змінюється від одного водного об'єкта до іншого. В зв'язку з цим одержані на одній водоймі результати можуть бути екстрапольовані на інші водойми тільки після відповідної перевірки і доробки. Це ще раз підтверджує, що використання статистичної регресивної моделі повинно базуватись на даних контрольних наземних вимірів низки обов'язкових параметрів.

Винятковий інтерес має космічна інформація щодо динаміки розвитку процесів акумуляції матеріалу переробки берегів і річкового стоку, заростання й заболочення гирлових зон, переформування дельт великих річок і утворення мілин. Самостійного значення набули спостереження за формуванням берегової смуги водосховищ. З часу їх утворення почалися зміни берегової смуги внаслідок хвильових процесів, що призвело до збільшення ширини мілководдя. За цією ознакою в ряді випадків можна простежити процес абразії на космічних знімках, розділяча здатність яких недостатня для реєстрації зміни берегової лінії. При цьому в кожному конкретному випадку необхідно враховувати геологічні умови в береговій зоні. На космічних знімках ділянки водойм, де інтенсивно акумулюються донні відкладення, можуть бути ідентифіковані в спектральному діапазоні $\lambda\lambda$ 600—



Рис. 2. Зони забруднення, заростання та зміління в Каховському водосховищі

700 нм за стійкими аномаліями концентрацій стокового матеріалу у вигляді зависей. В більшій мірі замулення зазнають затоки, а також ділянки, що прилягають до гирла річок, які впадають в водосховища. В прозорій і неглибокій прибережній воді в короткохвильовому діапазоні спектра можна одержати інформацію про будову дна і дослідити його рельєф (ділянки мілководь і мілин).

На рис. 2 наведено зображення верхньої частини Каховського водосховища, синтезоване із трьох космічних знімків, одержаних в трьох спектральних каналах ($\lambda\lambda$ 520—600, 600—690, 760—900 нм) апаратури ТМ супутника «Landsat», після проведеної нами класифікації за допомогою програми ERDAS IMAGINE в режимі контрольованого навчання. Внаслідок навчання програма автоматично вибирає найбільш відповідний умовам завдання, критерій, з тих, що реалізовані в ERDAS IMAGINE. Використання системи ERDAS IMAGINE у відповідності з класифікацією щільності тону зображення по градаціях яскравості і подання результатів у вигляді кольорокодованого зображення в широкій кольоровій гамі, яка виділяє характерні особливості розподілу забруднень, дозволяє наочно відобразити екологічну ситуацію в водоймі. При класифікації зображення за допомогою вирішального правила піксели розбиваються у

відповідності з рівнем забруднення на класи, що відрізняються на зображенні за градаціями яскравості, яким для зручності присвоюються різні кольори.

Одним із потужних джерел забруднень, що надходять у верхню частину Каховського водосховища, є річка Конка і очисні споруди міста Запоріжжя. Розповсюдження забруднень істотно впливає на гідрологічний і санітарно-біологічний стан в цій частині водосховища. На знімку видно, що центральна частина верхньої ділянки водосховища і гирло річки Конки помітно відрізняються характеристиками спектральної яскравості від інших зон водосховища. Стічні води, збагачені біогенними речовинами й органічними сполуками, обумовлюють бурхливий розвиток синьозелених водоростей й сприяють росту вищих водяних рослин. На знімку чітко ідентифікуються зони заростей водної рослинності та донні відкладення в центральній частині водосховища й гирлі річки Конки. Острови, мілководдя й мілини, на цій ділянці водосховища дешифруються в спектральній області $\lambda\lambda$ 520—600 нм.

Аналіз знімка показує, що змішування сигналів відбитого випромінювання одного спектрального діапазону від різних об'єктів, ускладнює їх ідентифікацію. Це завдання може бути розв'язане при

повторних послідовних космічних зйомках, коли завись, в тому числі й фітопланктон, змінює свій просторовий розподіл, в той час як зображення мілководь, відмілин і заростей вищої водної рослинності на повторних знімках мають стійкі контури. Місцеположення й просторова локалізація постійного забруднення визначаються шляхом синтезу дистанційних знімків однакового спектрального діапазону, рознесених за часом зйомки і приведеніх заздалегідь по геометрії і енергетиці в єдине зображення по кольорових каналах. При цьому кожний знімок подається градаціями обраного кодуючого кольору. Наприклад, кожний з трьох знімків, які досліджуються, подані градаціями червоного, зеленого і синього кольорів відповідно. Тоді з них можна синтезувати зображення в стандартній системі подання кольорів (R, G, B). Очевидно, що на одержаному таким чином синтезованому RGB-зображенні, в місцях, де щільність фототону на трьох вихідних знімках була однакою (або близькою), колір буде наближатися до градації сірого. Для вияву таких стійких за часом забруднень до всіх точок синтезованого зображення застосовується операція визначення «насиченості кольору» (величина відношення різниці максимуму і мінімуму щільності фототону компонентів кольору RGB до максимальної з них). Ділянкам стійких у часі забруднень будуть відповідати близькі до нуля значення «насиченості кольору».

Теплове забруднення водного середовища вище допустимих нормативних показників істотно погіршує екологічний стан водних об'єктів і якість води. Водосховища дніпровського каскаду мають значну площу мілководних ділянок (до 40 % від їх загальної площі), вода в яких добре прогрівається сонцем і, розповсюджуючись в поверхневих шарах, утворює стійкий термоклин на великих площах водойми. Термоклин гальмує водообмін між аерованим верхнім шаром і глибинними горизонтами, які споживають кисень на окислення органічних сполук. В результаті цього в зоні теплового забруднення виникає гострий дефіцит кисню й пов'язані з цим небезпечні екологічні наслідки. Такі літні дефіцити кисню зареєстровані на більшості великих водойм України. Друга проблема, яка виникає в результаті теплового забруднення це втрати прісної води за рахунок її випаровування. Для контролю цих явищ має практичний сенс використання космічної інформації, отриманої в довгохвильовому ІЧ-діапазоні спектра, в якому водна поверхня поглинає всю енергію падаючого потоку випромінювання й випромінює її в залежності від власної температури. Це використовується в дистанційних методах для визначення радіаційної температури

водної поверхні. Сучасні сканери зі спектральними каналами в діапазоні $\lambda\lambda$ 8—14 мкм реєструють перепад температур від 0.1 К, а абсолютні виміри температури при цьому мають точність порядку 1 К.

Виявлення зон теплового забруднення, пов'язаних з місцями постійного виходу стічних вод, або стійких теплових аномалій в зоні чорноморського шельфу, зумовлених річковим стоком, перемішуванням прибережної води і апвелінгом, здійснюється на основі вище викладеної методики дешифрування матеріалів космічної зйомки в ІЧ-діапазоні і комплексної інтерпретації одержаних результатів. На рис. 3 наведено космічний знімок («Landsat», ТМ, 6-й спектральний канал) ділянки Каховського водосховища в районі м. Енергодар, отриманий у спектральному діапазоні $\lambda\lambda$ 8—12 мкм після класифікації за градаціями енергетичної яскравості й значеннями радіаційної температури. В зв'язку з цим білий колір відповідає найбільшим значенням поверхневої температури, чорний — найменшим. На знімку впевнено дешифруються зони інтенсивного теплового забруднення в правобережній частині водосховища, а також чітко видно на лівому березі точкове джерело теплового забруднення в районі каналізованого скиду відпрацьованої теплої води. Також можна розрізнити неоднорідний розподіл температури на поверхні водойми-охолоджувача Запорізької АЕС.

На рис. 4 наведено тепловий космічний знімок (діапазон $\lambda\lambda$ 8—12 мкм), водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС, одержаний за допомогою апаратури ТМ супутника «Landsat» 29.05.1988 р. Було проведено класифікацію зображень за градаціями енергетичної яскравості, пропорційної радіаційній температурі водної поверхні. На знімках відтворюється властивий водоймам-охолоджувачам просторовий розподіл температур. По мірі руху води від каналізованого скиду енергетичного об'єкта до водозбору температура циркулюючої води за рахунок природного охолодження поступово знижується і зображення водної поверхні на знімку набуває все більш холодних відтінків. Найнижча температура води спостерігається в районі водозбору. Наведений знімок в достатній мірі дозволяє оцінити ефективність роботи водойми-охолоджувача та енергетичну потужність АЕС. Окрім того, на знімках можна помітити, що на прилеглій до водойми ділянці р. Прип'ять температура води вища, ніж на інших ділянках. Це свідчить про наявність фільтраційних процесів в захисній дамбі, в результаті яких тепла вода просочується з водойми-охолоджувача в р. Прип'ять. Виявлення фільтраційних процесів становить особливий інтерес з точки



Рис. 3. Розподіл температури по поверхні Каховського водосховища

зору радіаційного контролю, оскільки вода із спеціалізованої водойми-охолоджувача АЕС може переносити у відкриті водні об'єкти водорозчинні радіонукліди, розповсюджуючи тим самим забруднення по дніпровському каскаду.

Ефективність використання космічної інформації при контролі теплових забруднень і аномалій полягає в тому, що просторовий розподіл температур фіксується одночасно на площі в десятки і сотні квадратних кілометрів. Це дозволяє уникнути таких ефектів, як нестаціонарність метеоумов, зміни теплового навантаження, режимів проточності та інших спотворень.

При проведенні районування акваторій і класифікації водойм, оцінки їх біопродуктивності та якості води використовують показник трофності. Головним критерієм рівня трофності вважають як розвиток фітопланктону, так і умови, що його визначають. «Цвітіння» води — це складне біологічне явище, що виникає як наслідок екологічних порушень у функціонуванні водних екосистем. У водосховищах Дніпра «цвітіння» води може обумовлюватись масовим розвитком зелених, діатомових, синьозелених, а в останні роки на окремих ділянках і дінофітових водоростей. Найпоширеніше і відоме, внаслідок виникнення негативних наслідків, «цвітіння» води синьозеленими водоростями.

Завдяки наявності в їх клітинах газових вакуолей синьозелені водорості концентруються в поверхневих горизонтах води, утворюючи плями «цвітіння» специфічного синюватого забарвлення, що поширюються на великі ділянки акваторій (до декількох квадратних кілометрів) з концентрацією фітопланктону, а точніше сестону (включає не лише водорості, але й бактерії, частинки мертвої органічної речовини — детриту) від одиниць до десятків кілограмів на кубометр. Конфігурація плям «цвітіння» досить різноманітна — від ниткоподібно-смугастих до круглих та спірально-видних структур, що формуються під впливом поверхневих стокових і вітрових переміщень води (Сиренко и др., 1989). Інформаційні ознаки фітопланктону дозволяють виділити зони його розповсюдження на фоні таких маскуючих факторів, як неорганічні зависі, мілководдя й мілини. Картографування водної поверхні по інтенсивності «цвітіння» зводиться до оконтурювання зон, у відповідності з градаціями яскравості зображень, шляхом попередньої побудови для кожного конкретного космічного знімку шкали градації яскравості, що відповідає ступеням «цвітіння» води у водоймі. При дешифруванні зон локалізації фітопланктону на фоні зважених у воді частинок неорганічного походження треба пам'ятати той факт, що яскравість сигналу в діапазоні

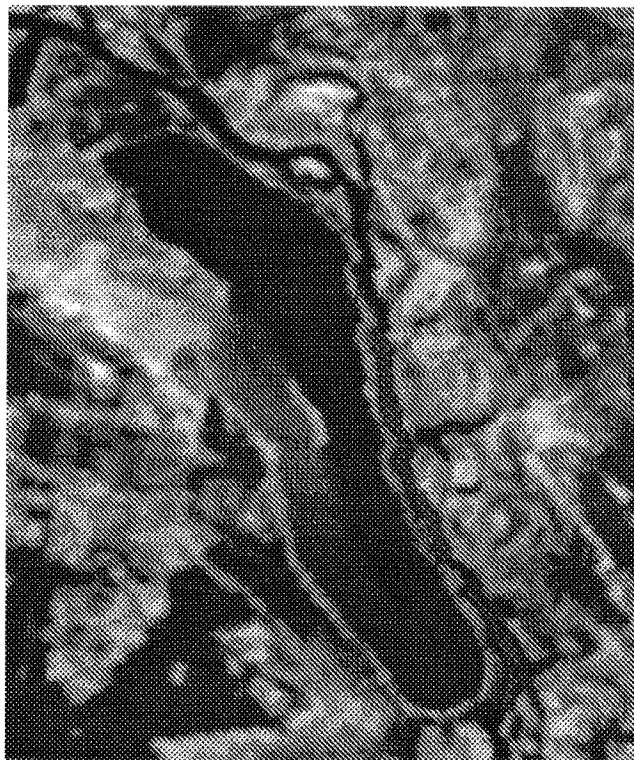


Рис. 4. Розподіл температури по поверхні водоймища-охолоджувача Чорнобильської АЕС

λλ 500—600 нм визначається як вмістом у воді фітопланктону, так і неорганічних зависей, а в діапазоні λλ 600—700 нм, в основному, неорганічних зависей. Проведені дослідження (Кондратьєв, Поздняков, 1985) свідчать про те, що при дистанційному визначенні хлорофілу в оліготрофних водоймах найінформативнішим є діапазон λλ 430—450 нм. Підвищена кількість фітопланктону в поверхневих шарах водойм приводить до збільшення відбиття по всіх каналах, в т. ч. і в ближній інфрачервоній зоні спектра (λλ 700—800 і 800—1100 нм), з максимумом в синьозеленій зоні — 500 нм. Результати лабораторних досліджень (Голоудин, 1995) свідчать про те, що для чистої культури фітопланктону максимум відбитого сигналу припадає на довжини хвиль λλ 550 нм і 700—750 нм, а мінімум — на 665 нм, що відповідає максимуму поглинання. Встановлена наявність зв'язку між концентрацією хлорофілу і КСЯ в ІЧ-діапазоні спектра (λλ 700—800 нм), що може бути апроксимований експоненціальною залежніс-

тю. В спектральному діапазоні λλ 800—1100 нм при концентраціях хлорофілу понад 100 мкг/л має місце лінійна залежність з коефіцієнтом кореляції 0.97.

При концентраціях хлорофілу 1—20 мкг/л доцільно використовувати алгоритми, що ґрунтуються на відношенні спектральних яскравостей L_{520}/L_{670} і L_{443}/L_{670} . Аналіз даних спостережень свідчить про те, що для визначення концентрацій хлорофілу, характерних для озерної води, найбільш інформативне співвідношення L_{520}/L_{670} (Bukata et al., 1981). На основі спектральних характеристик поглинання світла хлорофілом планктону, зокрема сильного поглинання в діапазоні λλ 440 нм та слабкого при 550 нм, зроблено висновок про те, що відношення $КСЯ_{440}/КСЯ_{550}$ і L_{440}/L_{550} дуже чутливі до змін концентрації фітопланктону.

Як і у випадку виявлення джерел забруднення водойм зваженими речовинами, для верифікації результатів визначення просторового розподілу фітопланктону необхідно провадити синхронні наземні вимірювання на спеціально виділених тестових ділянках, а саме визначати концентрацію фітопланктону в місцях з раніше відомими координатами.

Розглянемо результати космічних спостережень зон «цвітіння» води на акваторії Київського водосховища у 1995 р.

На рис. 5 наведено зображення водосховища, яке було одержане як відношення спектральних яскравостей двох каналів космічного знімка, отриманого з супутника SPOT від 23.08.1995 р. в спектральних діапазонах $L_{500-600}/L_{600-700}$ відповідно. Розглядаючи зображення водної поверхні, можна помітити наявність значної плямистості в нижній частині водосховища. Чітко видно, як під впливом вітрових та стокових переміщень води формуються плями «цвітіння» і нагонні маси скупчень фітопланктону з його підвищеними концентраціями. Для визначення останніх одночасно з космічними вимірюваннями проводились наземні спостереження з борту науково-дослідного судна Інституту гідробіології НАН України «Академік Вернадський». Відхилення між відповідними відносними значеннями не перевищували 20—50 %. Прокалібрувавши значення сигналу у відповідних точках цифрового космічного зображення за результатами натурних спостережень і побудувавши шкалу градацій яскравості космічного зображення, можна створити картосхему просторового розподілу концентрації фітопланктону по водосховищу. Одержана таким чином інформація дозволяє визначити не лише локалізацію на акваторії, але й переважний напрям дрейфу плям «цвітіння» води для своєчасної організації

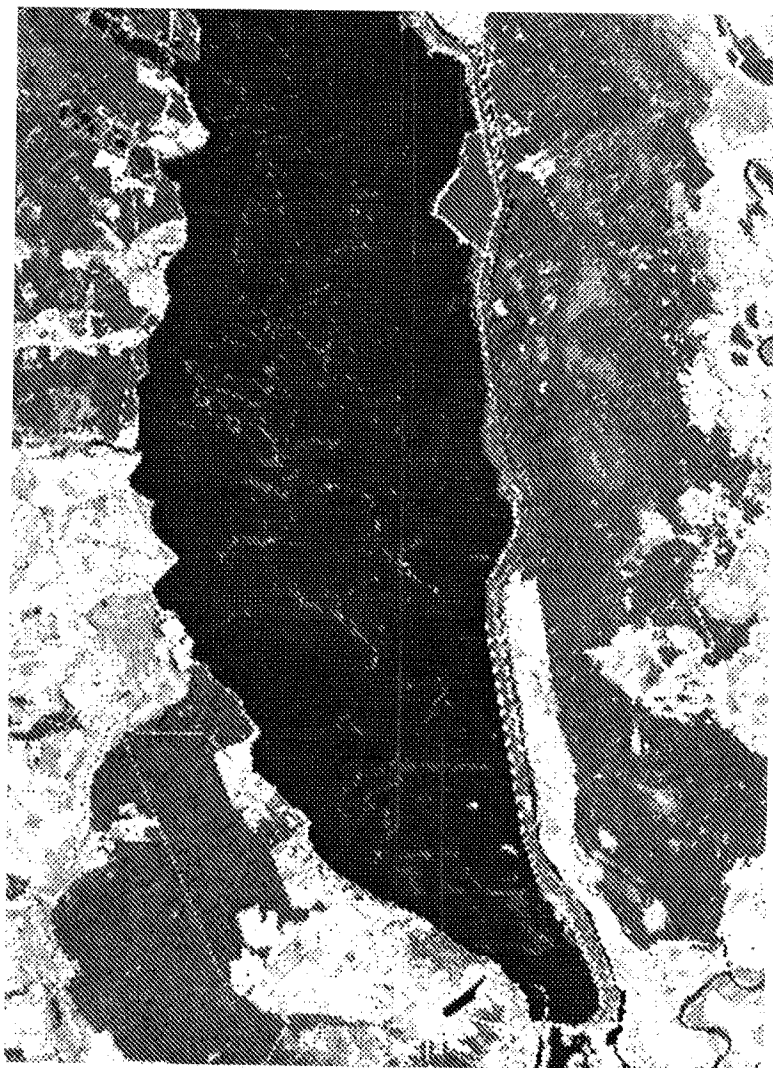


Рис. 5. Розподіл зон «цвітіння» води по акваторії Київського водосховища

водоохоронних заходів в районах питтєвих та технічних водозаборів, зон рекреації, рибоводних садків, насосних станцій.

Погіршення якості води в період повеней зумовлено як руйнуванням берегової смуги, затопленням цвинтарів і скотомогильників, так і колосальним зливом з територій, які затоплюються, біогенних елементів, хімічних, біологічних і радіоактивних забруднень, скаламученням і перерозподілом мулових донних відкладень. Інтенсивність і швидкість міграції радіонуклідів значно підвищується як внаслідок їх змиву поверхневими водами, так і при проникненні їх в ґрунтові води. Особливо сприяють інтенсивності цих процесів весняні повені. Свіжим прикладом погіршення екологічної ситуації на Дніпрі може бути затоплення забрудненої радіонуклідами заплави 30-км зони Чорнобильської АЕС

внаслідок злив в басейні р. Прип'ять в липні 1993 р. Підсилення притоку прип'ятської води, хвиля якої пройшла по всьому каскаду, порушило режим роботи водозаборів міст і населених пунктів. Домінування прип'ятської води сприяло збільшенню в 2—3 рази вмісту гумінових речовин, заліза, змінило величину рН, концентрацію органічної речовини, сполук фенолу, підвищило вміст радіонуклідів. Хвиля забрудненої радіонуклідами прип'ятської води вже в серпні—вересні 1993 р. була зареєстрована біля Канівської ГЕС і просувалась вниз по каскаду. Тривожна ситуація із затопленням забруднених радіонуклідами територій в басейні р. Прип'ять виникала і взимку 1994—1995 рр. внаслідок нагромадження льоду в гирлі річки і підвищення рівня води. Моніторинг розвитку подій, своєчасне попередження про загрозу і

прогноз розвитку повені можуть бути одержані лише на підставі регулярного контролю небезпечних ділянок річок при їх дистанційному зондуванні. В зв'язку з цим особливу актуальність набувають роботи з розробки методів контролю за розвитком повені і максимального зниження її негативних наслідків. Наші дослідження свідчать про те, що перспективним методом такого аналізу є порівняльний аналіз оптичних і радіолокаційних космоснімків, виконаних в різні періоди часу. Навесні 1996 р. в ЦАКДЗ ІГН НАН України було виконано такий порівняльний аналіз розвитку весняної повені 1996 р. з аналогічними періодами 1984, 1986, 1994 рр. і періодом межені 1995 р. Для цього використовувались матеріали мультиспектральних космічних знімків SPOT, «Landsat» і радіолокаційного знімка ERS. Роботи виконувались за допомогою програмного пакета ERDAS IMAGINE. В результаті проведення класифікації зображення було виділено водну поверхню як окремий клас, а потім і шар. Далі шляхом накладання зображення водної поверхні (як шару) за даними знімка ERS на зображення знімків SPOT і «Landsat» проведено порівняння площ затоплення в межиріччі Прип'яті та Дніпра під час весняної повені 1996 р. з даними попередніх років. Було встановлено, що межі повені 1996 р. на час зйомки менші, ніж за аналогічний період 1986 р., значно менші, ніж в 1994 р., схожі з повінню 1984 р. і лише дещо перевищують межі водної поверхні під час межені 1995 р. В зв'язку з тим, що в зимово-весняний період (лютий—квітень) значна територія України вкрита суцільною хмарністю, для контролю за повінню є ефективним використання радарних знімків.

Комплекс виконаних робіт свідчить про те, що заростаюча водними рослинами частина мілководних ділянок (літораль) водосховищ відноситься до важливих інформаційних зон водних екотонів. До числа останніх належать також і прибережні зони на межі поділу беріг—водойма, гирла річок (річка—водосховище, річка—море). Ці зони, з одного боку, є найбільш критичними ділянками водних об'єктів з точки зору можливості погіршення екологічної і санітарно-епідеміологічної ситуації в регіоні їх знаходження. З іншого боку, вони є найбільш інформативними ділянками, контроль за станом яких дозволяє не тільки оцінювати екологічну ситуацію, а й прогнозувати її розвиток. Найбільш складні екотони виникають в зоні контакту двох середовищ при утворенні могутніх заростей водних рослин (повітряно-водних, занурених і з плаваючим листям). У зв'язку з цим значний інтерес викликає використання космічних знімків водних

об'єктів, які дозволяють оперативно одержувати інформацію про зміни морфометрії, гідрологічного режиму, видового і просторового розподілу водної рослинності, оцінювати якість води в регіоні, стан нерестилищ і виділяти найпродуктивніші ділянки водойм на великих площах акваторії.

Розроблені в ЦАКДЗ ІГН НАНУ методика і програма VRLK для ЕОМ були апробовані на прикладі класифікації космічних знімків ділянок водної рослинності і визначення якості води в гирловій зоні р. Прип'ять (Федоровский и др., 1996). Як показали проведені дослідження, програма VRLK може бути застосована для оцінки екологічного стану екотонів типу «річка—водосховище», «берег—водойма» по інформації, одержаній за допомогою космічних знімків і наступної екстраполяції наземних спостережень. Такий підхід при використанні інтегральних інформативних показників водної рослинності відкриває нові можливості для виявлення загальних тенденцій змін, які відбуваються в водних екосистемах, і може скласти основу комплексного їх моніторингу на якісно новому рівні.

Необхідно мати на увазі, що будь-які водойми — динамічні системи, тому параметри водної поверхні, що вимірюються з космосу, мають значну амплітуду коливань в часі та просторі навіть в межах однієї водойми. Внаслідок цього ще не існує універсального алгоритму, який би визначав екологічний стан водойми тільки за результатами ДЗЗ. Для більшої вірогідності космічні зйомки обов'язково повинні періодично доповнюватись наземними калібрувальними вимірюваннями на еталонних тест-ділянках. Це значно підвищить надійність як якісної, так і кількісної інформації про стан водних екосистем.

- Голоудин Р. И. Дистанционные методы эколого-гидрографического изучения и картографирования акватории // Исслед. Земли из космоса.—1995.—№ 3.—С. 115—122.
- Камов И. Ю. Адаптивные алгоритмы оценивания содержания хлорофилла-а фитопланктона по данным дистанционного зондирования мезотрофных и евтрофных водных объектов // Исслед. Земли из космоса.—1992.—№ 1.—С. 46—50.
- Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Дистанционные методы слежения за качеством природных вод. — Л.: Наука, 1985.—62 с.
- Кондратьев К. Я., Брук В. В., Дружинин Г. В. и др. Возможности использования космической информации для изучения процессов загрязнения и евтрофирования озерных систем // Исслед. Земли из космоса.—1988.—№ 4.—С. 49—57.
- Кондратьев К. Я., Шумаков Ф. Т. Дистанционный мониторинг евтрофирования водоемов // Водные ресурсы.—1990.—№ 5.—С. 152—158.
- Кондратьев К. Я. Развитие космического дистанционного зондирования в США: итоги разработок за 1994-й финансовый год // Исслед. Земли из космоса.—1996.—№ 2.—С. 118—123.

- Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—№ 1.—С. 107—121.
- Красовский Г. Я., Бузников А. А., Ведешин Л. А. Картографирование пятнистости озер и водохранилищ по материалам космических съемок в целях информационного обеспечения принятия водоохранных решений // Исслед. Земли из космоса.—1989.—№ 4.—С. 53—58.
- Лялько В. И., Федоровский А. Д. Центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины: перспективы и достижения // Геолог. журн.—1996.—№ 1—2.—С. 67—72.
- Сиренко Л. А., Корелякова И. Л., Михайленко Л. Е. и др. Растительность и бактериальное население Днепра и его водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1989.—231 с.
- Федоровский А. Д., Сиренко Л. А., Звенигородский Э. Л. и др. Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 1—4.
- Феоктистов А. А., Молчанова А. Ф., Злобин Е. А. и др. Дистанционное зондирование акватории и береговой зоны Ивановского водохранилища // Исслед. Земли из космоса.—1994.—№ 4.—С. 93—94.
- Bukata R. P., Jerome J. H., Bruton J. E. et al. Water quality model of like Ontario. I. Determination of the optical cross section of organic and inorganic particulates in like Ontario // Appl. Opt.—1981.—10, N 9.—P. 1696—1703.
- Bukata R. P., Jerome J. H., Kondrtyev K. Y., Hlydykov D. V. Optic properties and remote sens. Of inland and coastal waters. — N. Y.: CRC press, 1995.—365 p.
- Lathorp R. G., Lillesand T. M., Vandell B. S. Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms of monitoring turbid inland waters // Int. J. Rem. Sens.—1991.—12, N 10.—P. 2045—2063.

USING THE SPACE INFORMATION FOR SOLVING THE PROBLEMS OF WATER MANAGEMENT AND WATER GUARD

V. I. Lial'ko, O. D. Fedorovs'kii, L. Ya. Sirenko,
O. D. Riabokonenko, Yu. V. Kostiuchenko, and V. H. Yakymchuk

We review some examples of the use of space information for solving various problems in water management and water preservation. Spectral information features which can be used for a remote estimation of water environment condition are considered. The basic principles of decoding space images are illustrated by the example of water objects of Ukraine.

УДК 528.553.98

**Обоснование методики внешнего контроля
космической оптической аппаратуры
дистанционного зондирования земной поверхности**

А. Д. Федоровский, В. И. Кононов, К. Ю. Суханов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 28.01.97

Розглядається методика наземного контролю функції передачі модуляції та роздільної здатності оптичної аппаратури дистанційного зондування земної поверхні, функціонуючої на борту космічного апарата. Приведено розрахунок параметрів аппаратури супутника «Січ-1» (МСУ-С).

Контроль основных параметров оптической аппаратуры дистанционного зондирования, функционирующей на борту космических спутников, например, «Січ-1» (аппаратура МСУ-С) в процессе их орбитальных полетов, является одной из важных задач, решаемых наземными службами. Традиционные методики наземной проверки амплитудно-частотной характеристики и разрешающей способности такой аппаратуры основаны на непосредственном сканировании специальных тест-объектов и калибровочных мир, расположенных на земной поверхности. Это связано с созданием достаточно сложных и дорогостоящих наземных сооружений.

Предлагается для оперативного контроля функции передачи модуляции (ФПМ) и реальной разрешающей способности аппаратуры дистанционного зондирования (с учетом факторов полета спутника) использовать переходную функцию аппаратуры. Последняя определяется в наземных условиях по космическим снимкам, полученным с помощью контролируемой аппаратуры и переданным по каналам связи.

Известно, что ФПМ представляет собой модуль оптической передаточной функции (ОПФ) и является пространственной амплитудно-частотной ха-

рактеристикой (АЧХ) аппаратуры, определяющей зависимость изменения амплитуды синусоидального оптического сигнала на выходе всей системы от пространственной частоты. Эта функция однозначно связана с распределением освещенности в изображении границы резкого раздела между соседними участками земной поверхности (светлым и темным, теплым и холодным). Если в плоскости объектов имеется такая граница («краевой след»), то регистрирующая оптическая аппаратура в зависимости от размера ее мгновенного поля зрения сгладит эту границу в большей или меньшей степени. В оптике функцию, описывающую распределение освещенности в изображении «краевого следа», называют пограничной кривой.

Существует способ непосредственного пересчета пограничной кривой в ОПФ. Эти характеристики связаны следующим уравнением

$$H(x) = 0.5 + \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(2\pi i\nu)}{\nu} \exp(2\pi i\nu x) d\nu,$$

где $H(x)$ — пограничная кривая аппаратуры; $T(2\pi i\nu)$ — ОПФ аппаратуры, ν — пространственная частота.

Однако решение этого уравнения связано со значительными математическими трудностями. Поэтому в данной работе применен другой подход, который использует взаимосвязи между пограничной кривой, функцией рассеяния линии и ФПМ.

Известно, что нормированные значения освещенности в каждой точке изображения полуплоскости связаны со значениями функции рассеяния линии следующим выражением (Гудмен, 1970)

$$H(x) = \int_{-\infty}^x A(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $A(\xi)$ — функция рассеяния линии; ξ — текущее значение аргумента в системе координат, где ось ξ совпадает с осью координат X .

Между ОПФ и функцией рассеяния линии существует однозначная связь — эти функции получают друг из друга прямым и обратным Фурье-преобразованием. Известно, что функция рассеяния линии является одномерным преобразованием функции рассеяния точки. Для многих практических случаев функции рассеяния точки имеют круговую симметрию, а соответствующие им ОПФ изотропны в области пространственных частот. Тогда для получения ОПФ можно воспользоваться одномерным вариантом Фурье-преобразования

$$T(iv) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cdot \exp(-2\pi ivx) dx, \quad (2)$$

где $\nu - \nu_x$ — пространственная частота по оси X .

Так как для случая симметричной ОПФ фазовая составляющая равна нулю, то ОПФ в этом случае равна ФПМ:

$$T(iv) = |T(iv)| = T(\nu).$$

Пределы интегрирования в выражении (2) реально имеют конечные значения и связаны с протяженностью нормированной пограничной кривой. Последнее определяет точность получения ФПМ в области низких пространственных частот.

Функцию $A(x)$ для случая аэрокосмических оптических систем часто аппроксимируют законом Гаусса

$$A(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2\sigma^2), \quad (3)$$

где σ — постоянная закона Гаусса, имеющая для нашего случая размерность линейной величины.

Тогда с учетом (3) выражения (1) и (2) примут следующий вид

$$H(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2/2\sigma^2) dx, \quad (4)$$

$$T(iv) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2/2\sigma^2) \exp(-i2\pi vx) dx. \quad (5)$$

Известное (Кононов, Федоровский и др., 1981) решение уравнения (5) имеет вид

$$T(\nu) = \exp(-2\pi^2\sigma^2\nu^2). \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), для аппроксимации ФПМ законом Гаусса необходимо знать величину σ , которую можно определить двумя способами. Первый способ основан на том, что при значении $\sigma = 1$ уравнение (4) переходит в выражение нормальной функции распределения (функции Лапласа).

Задаваясь значениями $x_1 = -1$ и $x_2 = 1$, по таблицам функции Лапласа получаем значения $H(x_1) = 0.16$ и $H(x_2) = 0.84$. Таким образом, для определения значения параметра σ на нормированной пограничной кривой необходимо отметить точки на уровне 0.16 и 0.84 и спроецировать их на ось X . Отрезок $x_2 - x_1$ по величине будет равен 2σ (Гаприндашвили и др., 1972).

Второй способ определения параметра σ реализуется в два приема. Вначале аналитически путем дифференцирования выражения (4), находится связь между максимальным градиентом пограничной кривой φ_{Hmax} и параметром σ :

$$\varphi_{\text{Hmax}} = [dH(x)/dx]_{\text{max}} = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}),$$

откуда $\sigma = 1/(\varphi_{\text{Hmax}}\sqrt{2\pi}) \sim 0.4/\varphi_{\text{Hmax}}$.

Затем методом численного дифференцирования реальных пограничных кривых определяется φ_{Hmax} .

Реальная пограничная кривая определяется экспериментально по космическим снимкам, полученным в процессе сканирования земной поверхности и переданным по каналам связи. При этом установлено, что ширина зоны раздела между полями с различными световыми или температурными контрастами не должна превышать 0.1—0.2 от диаметра проекции мгновенного поля зрения на плоскость земной поверхности, а направление линии измерения пограничной кривой по отношению к линии раздела световых полей должно находиться в пределах $90 \pm 5^\circ$.

При экспериментальном определении пограничной кривой необходимо обеспечить линейность амплитудной характеристики аппаратуры дистанционного зондирования в диапазоне значений амплитуд реальных сигналов и отработать процедуры нормировки сигнала по амплитуде и ограничения пограничной кривой по протяженности. Полученная таким образом нормированная пограничная кривая используется для определения параметра σ , необходимого для расчета ФПМ аппаратуры, на-

пример, типа МСУ по формуле (6).

Теперь остановимся на процедуре определения разрешающей способности аппаратуры дистанционного зондирования с использованием данной методики. Несмотря на то, что в последнее время этот критерий подвергается существенной критике (Березин, Кононов, 1981) на практике его продолжают применять. Это объясняется достаточной наглядностью и многолетней традицией его использования.

В нашем случае разрешающая способность аппаратуры находится как точка пересечения кривой ФПМ с кривой пороговой модуляции приемника излучений. В первом приближении разрешающую способность можно определить по уровню ФПМ равному величине результирующих шумов приемника оптической системы — $K_{\text{пор}}$, нормированные значения которых могут изменяться в пределах 0.15—0.3 от максимального значения ФПМ. При этом используется соотношение

$$k \exp(-2\pi^2\sigma^2 R_k^2) = K_{\text{пор}}, \quad (7)$$

где k — контраст синусоидальной миры.

Выражение (7) получено при подстановке $\nu = R_k$ в формулу (6). Из (7) находим

$$R_k = \sqrt{-[\ln(K_{\text{пор}}/k)]/(2\pi^2\sigma^2)}.$$

Линейный элемент разрешения на местности b_k определяется по формуле

$$b_k = 1/2R_k. \quad (8)$$

Поскольку разрешающая способность характеризуется высоко-частотной областью ФПМ, определяемой, в основном, областью максимального градиента пограничной кривой, то целесообразно для вычисления разрешающей способности определять параметр σ по уровням близким к ее центральной части, т. е. при $x_1 = -0.5$ и $x_2 = 0.5$, что соответствует уровням пограничной кривой 0.3; 0.7 и $x_2 - x_1 = \sigma$. При таком определении параметра σ лучше аппроксимируется высокочастотная область ФПМ, чем при определении этого параметра по уровням 0.16 и 0.84. При вычислении результирующих значений ФПМ для уменьшения средней квадратичной ошибки целесообразно использовать среднее значение параметра σ .

Экспериментальная проверка данной методики осуществлялась на примере пересчета пограничной кривой, полученной при сканировании аппаратурой МСУ-С, установленной на борту спутника «Січ-1», береговой линии Черного моря. Была рассчитана ФПМ и определено значение линейного разрешения аппаратуры МСУ-С на местности.

Экспериментально полученные пограничные

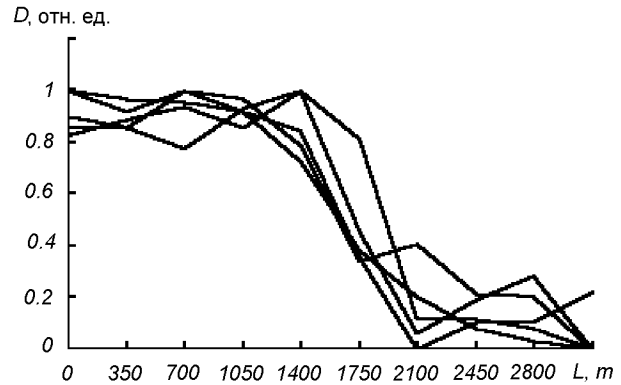


Рис. 1. Пограничные кривые, измеренные на космических снимках (аппаратура МСУ-С спутника «Січ-1»)

кривые (рис. 1) были пронормированы в соответствии с условием нормировки

$$H(x) = [L(x) - m_0]/(m_1 - m_0),$$

где $L(x)$ — текущее значение сигнала, m_0 и m_1 — математические ожидания сигнала, соответствующие его минимальному и максимальному уровням соответственно.

Математические ожидания m_0 и m_1 определяются усреднением реализации сигнала на участках до и после резкого перепада, размеры которых приблизительно соответствуют пяти протяженностям зон размытия. Следует отметить, что нормировку и определение величин m_0 и m_1 , необходимо производить только для случая визуального сглаживания. В случае использования процедуры сглаживания методом наименьших квадратов коэффициент аппроксимации получается в результате вычислений. Применение процедуры визуального сглаживания или сглаживания по методу наименьших квадратов определяется характером структуры фоновых поверхностей в зоне резкого перепада. При значительной неравномерности этого фона визуальное сглаживание более эффективно.

Расчет значений ФПМ, разрешающей способности $R_{1.0}$ и линейного разрешения на местности $b_{1.0}$ проводился по формулам (6), (7) и (8) с помощью экспериментально полученной пограничной кривой. При этом из набора пограничных кривых (рис. 1) после процедуры сглаживания выбирается кривая, имеющая наибольшую крутизну по сравнению с другими кривыми.

Рассчитанная с помощью выше изложенной методики ФПМ аппаратуры МСУ-С спутника «Січ-1» приведена на рис. 2. Результаты расчета $R_{1.0}$ и $b_{1.0}$ для двух значений $K_{\text{пор}}$ (0.2 и 0.25) приведены в

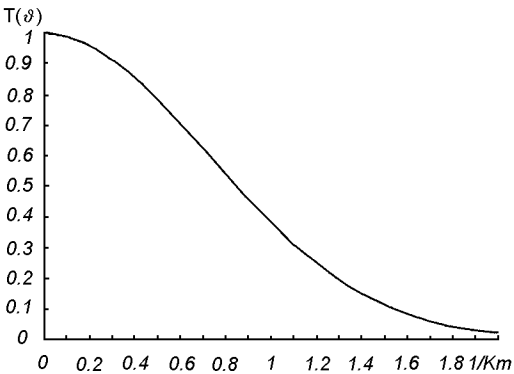


Рис. 2. Функция передачи модуляции аппаратуры МСУ-С спутника «Сич-1»

Значения параметров аппаратуры МСУ-С, полученные в результате измерений с помощью изложенной методики

$K_{пор}$	σ	$R_{1,0}, 1/км$	$b_{1,0}, м$
0.20	199	1.43	349
0.25	199	1.33	376

таблице, из которой видно, что для $K_{пор} = 0.2$ полученное значение $b_{1,0} = 349$ близко к номинальному значению $b_{ном} = 340$ м.

Рассмотренная методика может быть рекомендована для контрольных оценок реальных параметров оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности, функционирующей на борту космических объектов, снимки с которых используются для решения различных научных и прикладных задач.

Березин Н. П., Кононов В. И. Разрешающая способность: история, состояние и развитие // Оптико-мех. промышленность.—1991.—№ 11.—С. 33—38.

Гаприндашвили Х. И., Кононов В. И., Чибалашвили Ю. Л., Рябинин А. Д. Метод определения частотно-контрастных характеристик волоконно-оптических деталей по граничным кривым // Оптика и спектроскопия.—1972.—33, Вып. 3.—С. 561—563.

Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. — М.: Мир, 1970.—270с.

Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — Киев: Техніка, 1981.—134 с.

BASIS FOR THE TECHNIQUE OF THE EXTERNAL CONTROL OF THE OPTICAL EQUIPMENT FOR THE REMOTE SOUNDING OF THE EARTH SURFACE

A. D. Fedorovskii, V. I. Kononov, and K. Yu. Sukhanov

We discuss a technique for the ground control of the modulation transfer and the resolution of the optical equipment for the remote sounding of the Earth surface from board a space vehicle. As an example, we calculate some parameters of the equipment of the “Sich-1” satellite (MSU-S).

УДК 528.85/.87

Интеркалибровка разновременных многозональных космических снимков для экологического мониторинга (на примере исследований зоны влияния аварии на ЧАЭС)

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, А. Я. Ходоровский

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 11.02.97

Екологічний моніторинг в зоні впливу аварії на ЧАЕС виконується з використанням багатозональних космічних знімків, які одержані з різних космічних апаратів, за допомогою різної знімальної апаратури, у різні роки та при різних умовах зйомки. Для коректного зіставлення знімків була розроблена методика їх інтеркалібровки на основі використання природних еталонних об'єктів. Різниця спектральних яскравостей двох різночасових відкаліброваних космознімків використовувалась для оцінки зміни екологічного стану району досліджень.

ВВЕДЕНИЕ

Экологический мониторинг окружающей среды основывается на сопоставлении материалов многозональной космической съемки, выполненной в разные годы, с различных спутников, разной съемочной аппаратурой, при разных природных условиях (угол наклона солнечных лучей, расстояние от Земли до Солнца, прозрачность атмосферы и т. д.). Различия в условиях съемки не позволяют проводить корректное сопоставление спектральных яркостей и вегетационных индексов изучаемых объектов без предварительного учета влияния указанных выше факторов на спектральные яркости объектов.

Вопросы учета влияния различных природных факторов на спектральные яркости и проведение коррекции многозональных космоснимков для их сопоставления неоднократно рассматривались в научной литературе (Guyot et al., 1994; Hill et al., 1991; Junior, 1996). В основном коррекция снимков проводилась при определении вегетационных индексов. Без проведения коррекции, расчет величины вегетационных индексов может привести к существенным погрешностям (Junior, 1996). Обычно при коррекции снимков пытаются учесть влияние отдельных факторов, которые могут привести к

изменению спектральных яркостей космоснимков. Однако, для экологического мониторинга достаточно учесть влияние суммы различных факторов. Такой подход рассматривается ниже и называется интеркалибровкой снимков. Интеркалибровка представляет собой приведение спектральных яркостей сопоставляемых снимков к одному из них, выбранному в качестве базового (или эталонного). Выбор базового снимка проводится на основе содержания решаемой задачи и качества сравниваемых снимков.

Интеркалибровка разновременных снимков позволяет осуществить их сопоставление путем получения нового изображения, представляющего собой разность спектральных яркостей в отдельных зонах электромагнитного спектра. Можно ожидать, что на этом изображении четко проявятся все изменения в характере растительности, вызванные воздействием токсикантов, и которые не всегда четко видны при визуальном сопоставлении снимков.

МЕТОДИКА РАБОТ

Для корректного сопоставления спектральных яркостей изучаемых объектов на снимках разных лет

используются искусственные эталоны. При отсутствии искусственных эталонов для интеркалибровки космических снимков мы предлагаем использовать природные объекты, оптические свойства которых остаются практически неизменными на протяжении большей части года. Близкий подход был использован в работах Ji Changyuan, D'Souza Giles (1991), Casacchia, et. al. (1994).

Выбор эталонных объектов является наиболее ответственной и сложной операцией, от корректности выполнения которой зависят результаты всех дальнейших исследований. В каждом конкретном районе эталонные объекты выбираются по существующим условиям. Выбранные объекты обязательно подвергаются тестированию с целью определения их пригодности в качестве эталонов. Основными критериями для отбраковки намечаемых эталонных объектов являются постоянство их спектральных яркостей в пределах одного сезона года при однотипных погодных условиях и соответствие их спектральных яркостей тем, которые характерны для данного вида объектов.

Априори к таким объектам могут быть отнесены водная поверхность, крупные промышленные сооружения, пески пляжей, выходы скальных пород и некоторые другие. Необходимо не менее 4—5 видов эталонных объектов, а количество эталонных участков по каждому объекту не менее 7—10 для получения статистически достоверных результатов. Выбранные объекты должны охватывать весь диапазон изменений интенсивности спектральных яркостей, от самых темных до наиболее светлых.

С целью обработки результатов измерений целесообразно использовать корреляционный анализ.

Проведенные эксперименты показали, что корреляционная связь между спектральными яркостями сопоставляемых снимков надежно описывается линейной регрессионной зависимостью вида

$$D_n = C_{sc} D + C_{sh},$$

где D и D_n — исходное и приведенное к уровню опорного снимка значения спектральных яркостей соответственно, C_{sc} и C_{sh} — коэффициенты масштабирования и сдвига соответственно, учитывающие различия в прозрачности атмосферы, условиях освещенности и т. д.

Коэффициент определенности рассмотренной регрессионной зависимости должен быть не ниже 0.85—0.9 для надежной интеркалибровки снимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка методики интеркалибровки и ее практическое использование были выполнены в процес-

се изучения изменений экологической ситуации в районе влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Исходными материалами послужили многозональные космические снимки, сделанные с ИСЗ «Космос», «Ресурс», SPOT и «Landsat» с 1980 по 1995 гг. В качестве эталонных объектов использовались: водная поверхность, песок, участок полотна железной дороги, отдельные участки промзоны ЧАЭС. В пределах каждого из выделенных типов объектов первоначально было сделано от 20 до 200 замеров спектральных яркостей. Анализ проведенных замеров показал, что внутри первоначальных эталонных объектов лишь на отдельных участках на протяжении ряда лет сохраняются относительно постоянными и взаимокоррелированными значения спектральных яркостей в оптическом диапазоне. Около 20—25 % от первоначального количества замеров было отбраковано как не соответствующие указанным выше критериям. Корреляционный анализ спектральных яркостей исследуемых объектов на космических снимках разных лет, например, снимков SPOT 06.05.1986 г. и 23.08.1995 г., показал, что для красной зоны зависимость между спектральными яркостями снимков надежно описывается уравнением (рис. 1)

$$D_{86} = 0.459D_{95} + 11.56, \quad r = 0.947,$$

где D_{95} — спектральные яркости космоснимка SPOT 23.08.1995 г., D_{86} — спектральные яркости космоснимка SPOT 06.05.1986 г., приведенные к спектральным яркостям космоснимка SPOT

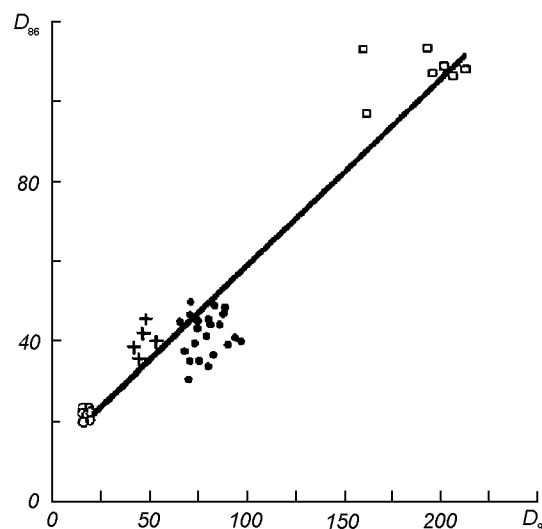


Рис. 1. Корреляция между спектральными яркостями D_{86} и D_{95} эталонных объектов на снимках SPOT 06.05.1986 г. и 23.08.1995 г. Красная зона ($\lambda\lambda$ 610—680 нм). Кружки — вода пруда охладителя ЧАЭС; крестики — участки железной дороги; точки — участки техногенных объектов ЧАЭС; квадраты — песок пляжей реки Припять

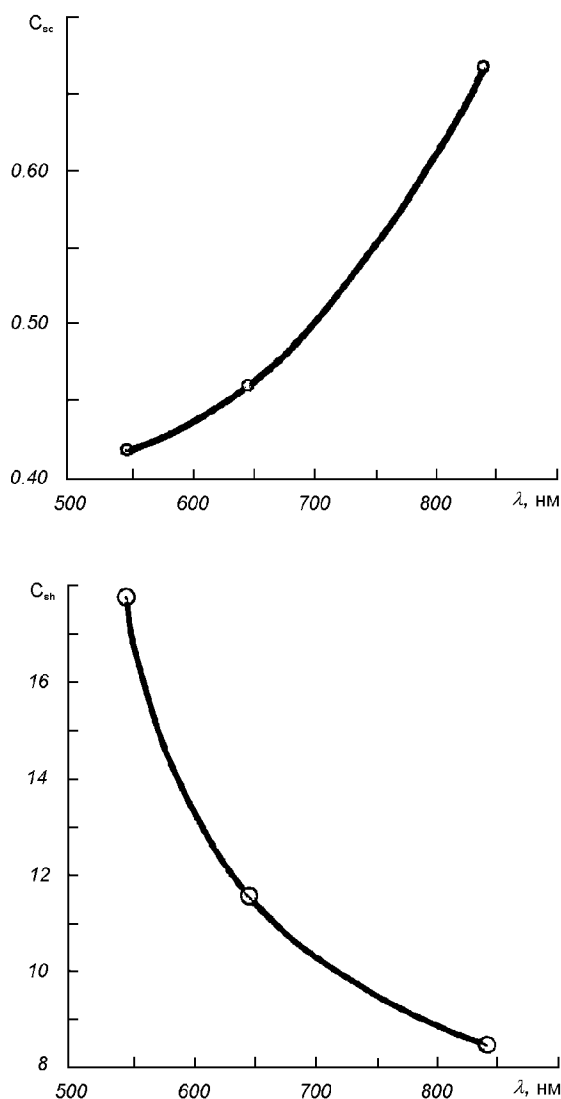


Рис. 2. Зависимость между коэффициентами масштабирования (C_{sc}) и сдвига (C_{sh}) от длины волны. Коэффициенты взяты из уравнения линейной регрессии при приведении спектральных яркостей ландшафтов снимка SPOT 23.08.1995 г. к эталонному (базовому) снимку SPOT 06.05.1986 г.

06.05.1986 г., r — коэффициент определенности рассмотренной регрессионной зависимости.

Коэффициенты масштабирования (C_{sh}) и сдвига (C_{sc}) закономерно изменяются с изменением длины волны электромагнитного излучения (рис. 2).

С увеличением длины волны в оптическом диапазоне коэффициент масштабирования закономерно увеличивается. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$y = 0.96 - 0.0022x + 2.19x^2$$

Коэффициент сдвига с увеличением длины волны

закономерно уменьшается и аппроксимируется кубическим сплайном:

$$y = 0.785 \cdot 10^{-6} (x - 545)^3 + 0.1778(645 - x) + 0.10775(x - 45).$$

Аналогичные зависимости получены и для других пар снимков.

Анализ полученных уравнений для разных пар снимков показал, что коэффициенты масштабирования для красной и ближней ИК-зон спектра близки между собой и заметно отличаются для зеленой зоны. Коэффициенты сдвига характеризуются большим размахом значений.

С целью визуального анализа изменений экологической ситуации за период с 1984 по 1995 гг. были построены новые изображения, представляющие собой разность яркостей в красной зоне спектра двух коррелированных снимков (рис. 3). Построенные изображения позволили выявить различные изменения, прошедшие на исследуемой территории за это время. Анализ изменений основан на данных, которые свидетельствуют о том, что спектральные яркости отражают процессы улучшения или ухудшения экологической обстановки в пределах отдельных ландшафтов (Lyalko et al., 1996).

Области, занятые отрицательными значениями разностей спектральных яркостей характеризуются, как правило, улучшением экологической обстановки, т. е. радионуклиды оказали здесь стимулирующее воздействие на растительность. Положительные значения разностей спектральных яркостей присущи участкам, где радионуклиды оказали угнетающее воздействие на растительность. Нулевые значения разностей характерны для областей со стабильной экологической обстановкой. Изменение спектральных яркостей на величину до 20 единиц связаны с природными изменениями. Изменения более чем на 20 единиц могут быть вызваны как влиянием радионуклидов, так и антропогенным воздействием на ландшафты (вырубка лесов, строительство дамб и т. п.).

Экологическое состояние окружающей среды в первые дни после аварии видно на изображении, представляющем разность спектральных яркостей ландшафтов в доаварийный период («Landsat», 16.04.1984 г.) и в момент, когда завершались активные выбросы из взорвавшегося реактора (SPOT, 06.05.1986 г.). На изображении видно, что все виды растительности, включая и наиболее чувствительные к воздействию радиации сосновые леса, еще не претерпели площадных изменений. Только в районе ЧАЭС, где сосновые леса получили летальные дозы облучения, отмечается их локальное пожелтение. Слабые изменения растительности зафиксиро-

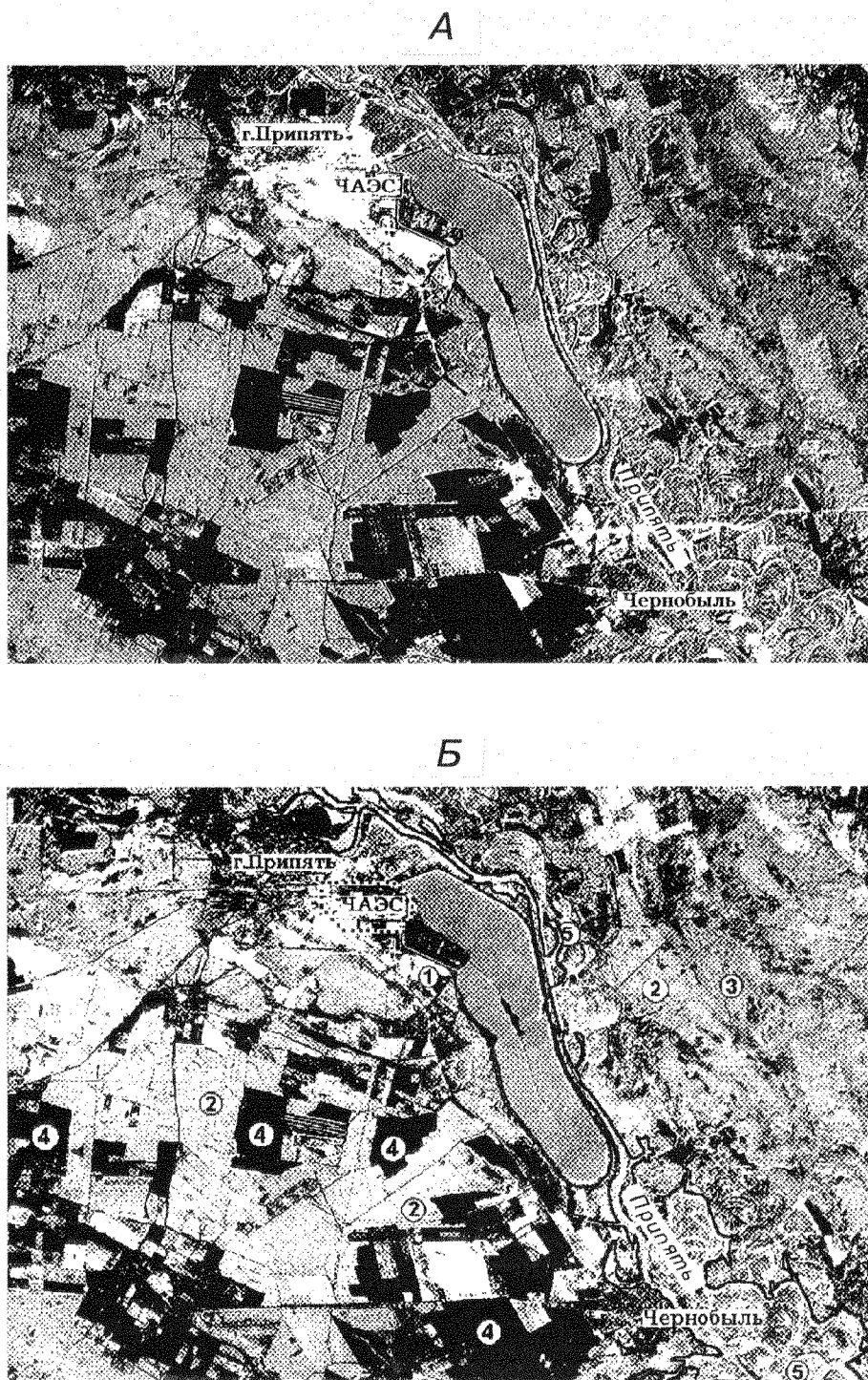


Рис. 3. Фрагменты изображений, отражающие величины разностей спектральных яркостей в красной зоне космоснимков: А — «Landsat» 29.05.1988 г. и SPOT 06.05.1986 г. Б — SPOT 23.08.1995 г. и SPOT 06.05.1986 г. (1 — «рыжий» лес, 2 — сосновый лес, 3 — лиственный лес, 4 — залежные земли, 5 — пойменные луга, точки — граница ЧАЭС). Повышение яркости фототона растительных покровов свидетельствует об ухудшении экологической обстановки

ваны в пределах г. Припять.

Экологическая ситуация на третий год после аварии видна на изображении, представляющем разность между снимками SPOT 06.05.1986 г. и «Landsat» 29.05.1988 г. (рис. 3). Судя по изображению, сосновые леса повсеместно заметно изменены, они приобрели пятнистую текстуру. К югу от ЧАЭС наибольшим изменениям подверглись северные окраины лесов. Слабо изменены лиственные леса. Четко отличается погибший «рыжий» лес, особенно те его участки, где проведено раскорчевывание и сплошное снятие грунта. Заметно ухудшилось состояние древесной растительности в пределах г. Припять.

Влияние радиации на состояние травянистой растительности не зафиксировано.

Изменения в экологии окружающей среды, которые произошли к настоящему времени фиксируются на изображении, представляющем собой разность снимков SPOT 06.05.1986 г. и SPOT 23.08.1995 г. (рис. 3). Анализ изображения показывает, что повсеместно техногенные радионуклиды оказывают отрицательное воздействие на сосновые леса и только местами наблюдается улучшение экологической обстановки.

В лиственных лесах окружающая обстановка не претерпела заметных изменений. Наиболее устойчивыми к действию радионуклидов оказалась травянистая растительность. Заметно чище стала вода в пруду-охладителе ЧАЭС.

Четко выделились новые техногенные объекты, возникшие после 1986 г., в том числе и те, которые не всегда уверенно проявляются на исходных снимках, прежде всего дамбы, которые должны предотвращать снос радионуклидами в реку Припять.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика интеркалибровки снимков позволяет использовать многозональные космические снимки разных лет, сделанные с различных спутников для проведения экологического мониторинга территорий с целью выявления как техногенных изменений, так и воздействия на растительность различных токсикантов, в том числе и радионуклидов.

В настоящее время предложенная методика интеркалибровки совершенствуется с целью сопоставления многозональных снимков, сделанных различными сканерами, установленными на спутниках «Landsat» и SPOT, а также многозональных фотографических и сканерных снимков различного

разрешения.

Разностные снимки позволяют визуализировать воздействие токсикантов, в частности радионуклидов, на растительность. При этом проявляются особенности площадного распространения и интенсивности воздействия токсикантов на растительность, которые не видны на исходных снимках.

- Casacchia R., Picchiotti A., Salvatori R. Multitemporal spectral analysis of Venice Lagoon features from Landsat-5 TM // Proc. 10th Them. Conf. Geol. Remote Sens. «Explorat., Environ., and, Eng.» (San Antonio, Tex., 9–12 May, 1994). — Ann Arbor (Mich), 1994.—Vol. 2.—10/44–11/53.
- Guyot G., Gu X.-F. Effect of Radiometric Corrections on NDVI-Determination from SPOT-HRV and Landsat TM Data Remote Sens. Environment 49, 1994.—P. 169–180.
- Hill J. H., Sturm B. Radiometric correction multitemporal Thematic Mapper data for use in agriculture land-cover classification and vegetation monitoring // Int. Remote Sens.—1991.—P. 1471–1491.
- Ji Changyuan, D'Souza Giles. Atmospheric correction of SPOT imagery using coniferous woodland as a standard reference reflector. Spatial Data 2000 // Proc. Jt Conf. Photogramm. Soc., Remote Sens. Soc., Amer. Soc. Photogramm. and Remote Sens., Oxford, 17th–20th Sept., 1991. — London, 1991.—P. 134–138.
- Junior J. Z. Atmospheric correction of satellite images in a tropical region // Proc. XVIII International Cong. Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII (ISPRS). — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 831–834.
- Lyalko V. I., Sakhatsky A. I., Hodorovsky A. J., et al. Estimation of heavy metal and radionuclide Contamination of the Soils and vegetation within the Chernobyl Danger Zone Using Remote sensing Data // Proc. XVIII Cong. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII. — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 454–459.
- Vermont E., Kaufman Y. I. Absolute of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views // Int. J. Remote Sens.—1995.—16, N 13.—P. 2317–2340.
- Weichert H., Pilarski M., Schmidt K., et. al. Applications of Multitemporal and Multisensoral Remote Sensing Data for Monitoring aspects in the East German opencast Lignite Mining and Post Mining Landscapes // Proc. XVIII International Cong. for Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII (ISPRS). — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 768–774.

INTERCALIBRATION OF MULTITEMPORAL MULTISPECTRAL SPACE IMAGES FOR THE ECOLOGICAL MONITORING (BY THE EXAMPLE OF THE CHERNOBYL DISASTER AREA)

V. I. Lial'ko, A. I. Sakhatskii, A. Ja. Khodorovskii

The ecological monitoring in the Chernobyl disaster area is based on the use of multiband space images, which have been acquired from, different satellites with various sensors, in the course of several years, under different imaging conditions. The method of image intercalibration using natural test objects has been developed for correct comparison of multitemporal images. The differences of reflectance spectra between some calibrated images was used for the assessment of changes in the ecological situation.

УДК 523.3

Прогноз содержания железа и титана в лунном реголите для сопоставления с данными КА «Лунар Проспектор»

Ю. Г. Шкуратов¹, В. Г. Кайдаш¹,
Н. В. Опанасенко¹, Д. Г. Станкевич¹, В. Г. Парусимов²

¹Астрономічна обсерваторія Харківського університету

²Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 22.05.97

Для видимої півкулі Місяця побудовані карти вмісту заліза і титану в шарі поверхні товщиною біля 100 мкм. Метою створення карт є їх зіставлення з результатами геохімічної зйомки, яку планується провести за допомогою американського КА «Лунар Проспектор». Карти побудовані за оптичними вимірюваннями в чотирьох ділянках спектру: $\lambda\lambda$ 0.42; 0.65; 0.75; 0.95 мкм. Для калібровки шкали карт використані значення хімічного складу в місцях посадок КА «Аполлон», «Луна» та «Сервейор». Використовується модель розсіювання світла, що дозволяє від оптичних характеристик розсіюючого шару перейти до параметрів речовини. Карти представлені в прямій ортографічній проекції. Побудовані гістограми розподілу характеристик. Розподіл заліза — бімодальний з максимумами мод 6 і 17 %. Побудована кореляційна діаграма «залізо—титан»; її спільний аналіз з даними для місць посадок показав, що більшість місць посадок КА відносяться до нетипового поєднання вмісту заліза і титану. Побудована карта типовості поєднань вмісту FeO та TiO₂. Згідно з цією картою базальти Моря Спокою, які містять велику кількість титану при відносно низькій концентрації заліза, не є типовими для Місяця.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается некоторое оживление в космических исследованиях Луны. Так, в 1992 г. была выполнена оптическая съемка части видимого и обратного полушарий Луны с помощью КА «Галилео» (Belton et al., 1992). Позднее, в 1994 г., была проведена глобальная спектроскопическая съемка Луны с высоким пространственным разрешением с помощью КА «Клементина» (Nozette et al., 1994). В сентябре 1997 г. в США предполагается запустить на окололунную орбиту КА «Лунар Проспектор» для выполнения глобального геохимического исследования лунной поверхности. Возможна реализация и некоторых других космических проектов — их обзор дан в работе Кислюка и др. (1996).

КА «Лунар Проспектор» будет картографировать содержание некоторых химических элементов, в частности железа и титана, с помощью гамма-спектрометра. Этот прибор позволит проводить измерения с относительной точностью порядка 10 % с пространственным разрешением несколько десятков километров. Исследования в гамма-диапазоне дают информацию об элементном составе поверхностного слоя толщиной порядка 1 м.

Измерения гамма-спектров — не единственный метод дистанционной оценки состава лунной поверхности. Для этих же целей используются оптические данные. Оценки состава лунной поверхности по оптическим измерениям основаны на существовании корреляций между количеством основных хромофорных элементов, содержащихся в лунных породах, и такими характеристиками, как

альбедо и показатель цвета в видимом участке спектра (Шкуратов и др., 1996).

Хотя оптические методы дистанционной диагностики состава лунного грунта еще продолжают совершенствоваться (Шкуратов и др., 1996), однако уже сейчас эти методы во многих случаях не уступают по точности гамма- и рентгеновской съемке, позволяя, как правило, сильно выигрывать в пространственном разрешении. К этому следует добавить, что, в отличие от гамма-спектроскопии, оптические методы дают информацию о поверхности в сравнительно тонком слое — порядка 100 мкм. Необходимо также отметить, что оптические измерения чувствительны не только к валовому содержанию хромофорных элементов, но и к их валентному состоянию. Например, относительно небольшое количество восстановленного мелкодисперсного железа, открытого в поверхностных зонах частиц лунного реголита (см. обзор Немошкаленко, 1996), приводит к заметному снижению их альбедо и изменению других спектральных свойств.

Относительное содержание таких форм восстановленного железа описывается параметром I_s/FeO (I_s — относительная концентрация мелкодисперсного железа, измеренная методом ферромагнитного резонанса). Этот параметр, как принято считать, является адекватной характеристикой степени зрелости лунного реголита (Morris, 1976; 1978). При прогнозировании содержания в лунном грунте железа и титана возникает необходимость и оценки параметра I_s/FeO . Эта задача привлекает к себе сейчас большое внимание (Fischer, Pieters, 1996).

Представляет значительный интерес сопоставление данных по определению химического состава лунных пород оптическим методом и методом гамма-спектроскопии. Это позволит лучше понять слабые стороны обоих методов.

В настоящей работе мы развиваем методику дистанционного оптического анализа состава лунной поверхности. С помощью нового подхода по данным телескопических измерений мы строим карты распределения по лунной поверхности железа и титана, а также степени зрелости реголита. Полученные распределения предполагается использовать для их сопоставления с результатами геохимических исследований лунной поверхности КА «Лунар Проспектор» в случае удачного выполнения им научной программы.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Предшествующие работы. Развитие методов прогноза содержания в лунных породах химиче-

ских элементов по данным оптических измерений можно разделить на два этапа. Первый из них начался фактически в период доставки проб лунного грунта на Землю экспедициями «Аполлон» и АМС серии «Луна» — тогда стало возможным проводить сопоставления оптических параметров материала лунной поверхности с его химико-минералогическими характеристиками. Наиболее надежные из обнаруженных корреляций рассматриваются как калибровочные и применяются для выполнения прогноза. В частности, широко известна корреляция между содержанием в грунте TiO_2 и показателем цвета (отношением альбедо A для двух участков спектра) материала лунной поверхности — $C(\lambda_1 / \lambda_2) = A(\lambda_1) / A(\lambda_2)$, где λ_1 и λ_2 — длины волн видимого диапазона — чаще всего около 0.6 и 0.4 мкм. Эта корреляция была предсказана в работе Johnson, Soderblom (1969). Ее существование подтвердилось в работах Евсюкова (1974), Charette et al. (1974). Делались попытки найти аналогичные корреляции для другого хромофора, содержащегося в лунном грунте, — FeO . В частности, исследовалась связь содержания этого окисла с альбедо (Евсюков, 1974) и глубиной микронной полосы поглощения d-d-типа минералов пироксенового и оливинового рядов, которая характеризуется показателем цвета $C(0.95/0.75)$ (Евсюков, Шестопалов, 1978). Найденные корреляции оказались ненадежными; не было понятно, каким образом можно учесть влияние степени зрелости лунного реголита.

Второй этап в развитии методов оптической диагностики лунной поверхности начался недавно — с появлением работ Lucey et al. (1995, 1996), Fischer, Pieters (1996), Шкуратов и др. (1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b). Лабораторные исследования лунного грунта (Lucey et al., 1995) показали некоторую закономерность в расположении на диаграмме альбедо—цвет, $A(0.75) — C(0.95/0.75)$, данных для образцов разной зрелости и состава. Оказалось, что образцы одного состава, но разной степени зрелости образуют последовательности, которые приблизительно ориентированы в направлении некоторой «особой» точки диаграммы, причем расстояние от этой точки характеризует степень зрелости образца: чем меньше расстояние, тем выше зрелость. Используя это, Lucey et al. (1995) предложили перейти на плоскости $A(0.75)$, $C(0.95/0.75)$ к новой системе полярных координат с центром в «особой» точке. В этом случае полярный угол оказывается связанным с содержанием железа, а радиальная координата — со зрелостью образцов грунта. Аналогичный подход был использован для «развязывания» влияния хи-

мии и зрелости применительно к определению содержания титана в лунных породах (Lucey et al., 1996; Blewett et al., 1997a). Для этого диаграмма $A(0.65) - C(0.65/0.42)$ представляется в новой прямоугольной системе координат — такой, что одна из осей минимизирует разброс точек на корреляционной диаграмме «титан—новая координата». Описанным способом были построены карты содержания в лунном грунте железа и титана для всей поверхности Луны (пространственное разрешение около 30 км); для этого использовались данные КА «Клементина» (Lucey et al., 1995, 1996).

Представленный подход, однако, обладает рядом недостатков. Отметим некоторые из них.

Прежде всего, предположение о существовании особой точки на диаграмме $A(0.75) - C(0.95/0.75)$ не обосновано физически. Рассматриваемая возможность разделения влияния состава и зрелости должна восприниматься только как эмпирический факт. При этом неясны границы его применимости. В частности, исследования показывают (Опанасенко et al., 1996), что, если совместить диаграмму $A(0.75) - C(0.95/0.75)$, построенную для образцов, с аналогичной диаграммой для видимого полушария Луны, то «особые» точки у них не совпадут.

Необходимо также обратить внимание на то, что в рамках рассматриваемого подхода распределение степени зрелости может быть найдено двумя способами: по диаграмме $A(0.75) - C(0.95/0.75)$ и по диаграмме $A(0.65) - C(0.65/0.42)$, однако эти распределения сильно отличаются друг от друга (Shkuratov et al., 1996; Опанасенко et al., 1996), что говорит об определенном несовершенстве метода.

Следует особо подчеркнуть недостаток, который очень характерен для современных работ, касающихся интерпретации спектров лунной поверхности и других безатмосферных небесных тел. Речь идет о том, что корреляции химического состава вещества рассеивающей поверхности обычно ищут с оптическими характеристиками этой поверхности, а не с оптическими постоянными ее вещества, как это следует делать. На это обращал внимание еще Розенберг (1967). Однако до сих пор из-за трудностей теории рассеяния света порошковыми поверхностями схема Розенберга используется редко (Шкуратов, 1987б).

Новый подход. Для демонстрации нашего подхода мы использовали собственные наблюдательные данные для видимого полушария Луны. Фотографические изображения были получены на 60-см рефлекторах Астрофизического института АН Казахстана и Майданакской наблюдательной станции ГАО НАН Украины (Опанасенко и др., 1996). Изображения вводились в ЭВМ с помощью автома-

тического сканирующего микроденситометра (Парусимов, 1981). Затем значения фотографической плотности преобразовывались в величины альбедо $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$. Для этого использовались характеристические кривые, построенные непосредственно по изображению Луны с помощью фотометрического каталога (Shkuratov et al., 1992). Изображения приводились к нулевой либрации и одинаковому пространственному разрешению, равному примерно 12 км в центре лунного диска. Кроме того, с помощью эмпирической формулы Акимова (1979) на них устранялся систематический ход яркости лимб-терминатор, возникающий за счет эффекта фазы (средний фазовый угол составлял примерно 6°). После этого, изображения корректировались по дискретному каталогу опорных точек с помощью методики, описанной в нашей работе (Shkuratov, Опанасенко, 1992).

В основном отличие нашего подхода от используемого в работах Lucey et al. (1995, 1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b) заключается в следующем.

Для того чтобы корректно решить обратную спектроаналитическую задачу (Розенберг, 1967), мы перешли от абсолютных значений альбедо лунной поверхности $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$ к оптическим характеристикам ее вещества. При этом применялась геометрооптическая модель, развитая в работах Шкуратова (1982, 1987а, б), Старухиной, Шкуратова (1996). Хотя эта модель и является приближенной, однако она неплохо зарекомендовала себя в оптике безатмосферных небесных тел; ее предсказания хорошо согласуются с результатами лабораторных измерений. Модель описывает светорассеяние порошкообразной средой с оптическими константами n и k (вещественная и мнимая части показателя преломления соответственно). Распространение лучей между рассеяниями характеризуется коэффициентом поглощения $\tau = 4\pi kl/\lambda$, где l — средний путь в частице между двумя внутренними отражениями. Элементарные акты отражения и преломления описываются усредненными по углам коэффициентами Френеля. Модель использует параметр s упаковки частиц.

Важным свойством этой модели является ее обратимость, т. е. возможность решить обратную спектроаналитическую задачу (Розенберг, 1967), когда по известному альбедо A , которое формируется как физическими свойствами вещества, так и структурой поверхности, находятся параметры вещества, а именно, мнимая часть показателя преломления. Из четырех параметров модели наибольшее влияние на альбедо оказывает произведение kl (Шкуратов, 1987а, б) и потому, используя априор-

ные оценки n , l и s , можно оценить величину k . Соответствующие формулы имеют вид (Старухина, Шкуратов, 1996):

$$k = \frac{\lambda}{4\pi l} \ln \left[\frac{b}{a} + \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - \frac{c}{a}} \right],$$

где

$$a = T_e T_i (y R_i + s T_e),$$

$$b = y R_b R_i + \frac{s}{2} T_e^2 (1 + T_i) - T_e (1 - s R_b),$$

$$c = 2y R_b - 2T_e (1 - s R_b) + s T_b^2,$$

$$y = (1 - A)^2 / 2A.$$

Величины R_b и R_i — соответственно средние коэффициенты отражения назад и вперед от границы частицы при падении света извне; R_i — средний коэффициент отражения от границы внутри частицы; T_e и T_i — средние коэффициенты пропускания света, проходящего снаружи внутрь частицы; соотношения между средними коэффициентами отражения и пропускания:

$$T_e = 1 - R_e \quad \text{и} \quad T_i = 1 - R_i,$$

где $R_e = R_b + R_i$ — коэффициент внешнего отражения, усредненный по всем направлениям.

Можно показать, что $R_i = 1 - (1 - R_e)/n^2$, поэтому $T_i = T_e/n^2$. Расчеты показали, что при $n = 1.4$ — 1.7 хорошие аппроксимации дают выражения:

$$R_b \approx (0.28n - 0.20)R_e;$$

$$R_e \approx r_0 + 0.05;$$

$$R_i \approx 1.04 - 1/n^2,$$

где r_0 — френелевский коэффициент отражения при нормальном падении.

Эти формулы и аппроксимации используются ниже для перехода от значений измеренных альбедо $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$ (см. ниже) к величинам $k(0.42)$, $k(0.65)$, $k(0.75)$ и $k(0.95)$; при этом принимаются следующие значения остальных параметров: $s = 0.5$; $n = 1.5$; $l = 50$ мкм (последняя величина отвечает среднему размеру частиц лунного реголита).

В отличие от работ Lucey et al. (1995, 1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b), в которых диаграммы $A(0.75)$ — $C(0.95/0.75)$ и $A(0.65)$ — $C(0.65/0.42)$ рассматривались независимо (это приводило к двум несхожим между собой распределениям степени зрелости), мы решили работать с трехмерной диаграммой $k(0.42)$ — $C_k(0.42/0.65)$ — $D_k(0.95)$, где $C_k(0.42/0.65) = k(0.42)/k(0.65)$, а $D_k(0.95)$ — характеристика глубины микронной полосы поглощения (индекс k

означает, что величины относятся к функции $k(\lambda)$). Параметр $D_k(0.95)$ используется вместо отношения $k(0.75)/k(0.95)$ потому, что это отношение характеризует не только полосу, но зависит от общего наклона спектра поглощения в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Для ослабления влияния этого наклона можно использовать величину $D_k(0.95) = k(0.95)/k_c(0.95)$, где $k_c(0.95)$ — коэффициент поглощения в континууме, найденный путем линейной экстраполяции функции $k(\lambda)$ по трем длинам волн — 0.42; 0.65; 0.75 мкм. Для экстраполяции применялся метод наименьших квадратов.

Далее ставилась задача нахождения в пространстве параметров $k(0.65)$, $C_k(0.42/0.65)$, $D_k(0.95)$ такой системы координат, которая удовлетворяет трем условиям. Первое из них формальное: новые координаты должны коррелировать с содержанием титана и железа лучше (независимо от зрелости), чем исходные оптические параметры. Два других условия отражают некоторые априорные знания о веществе лунной поверхности. Прежде всего, исследования образцов лунного грунта разной степени зрелости показали, что параметр I_c/FeO не коррелирует с содержанием железа (Mogris, 1978). Это означает, что на изображении, передающем распределение степени зрелости, граница море/материк должна отсутствовать. Кроме этого, можно предполагать, что материал лучевых систем, образовавшихся на древнем материке, сравнительно мало отличается по содержанию железа и титана от материала соседних областей. Действительно, лучевые системы образуются при вскрытии вещества, в основном за счет вторичных ударов, вызванных падением материала, выброшенного при возникновении основного кратера (Флоренский и др., 1982). Характерный диаметр вторичных кратеров составляет несколько сотен метров. В процессе их образования на поверхность извлекается вещество с глубин в десятки метров. Геологические исследования лунной поверхности, выполненные экспедициями «Аполлон», не дают никаких оснований предполагать наличие в области древнего материка систематической вертикальной неоднородности химического состава с характерным масштабом десятки метров. Таким образом, на изображениях, передающих распределения железа и титана по лунной поверхности, контраст лучевых систем в материковой области (например, для лучей кратера Тихо) должен быть сильно приглушен.

Чтобы выполнить сформулированные условия, мы перешли от системы координат $k(0.65)$, $C_k(0.42/0.65)$ и $D_k(0.95)$ к косоугольной системе, в которой две координаты, $C_k(0.42/0.65)$ и $D_k(0.95)$, остались почти неизменными, а вместо координаты

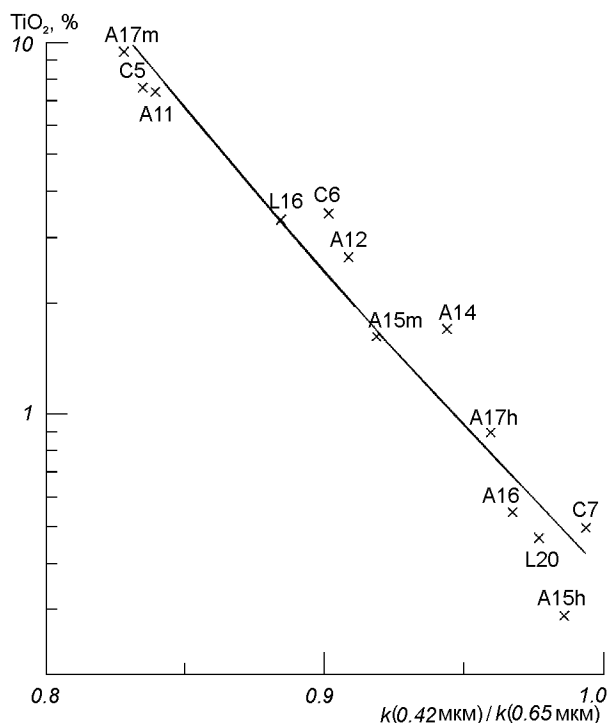


Рис. 1. Зависимость содержания TiO_2 от $k(0.42)/k(0.65)$ для мест посадки космических аппаратов серии «Аполлон», «Луна» и «Сервейер»

$k(0.65)$ используется параметр $\text{comb} = k(0.65)10^4 + 5D_k(0.95)$.

Для сопоставления новых координат с содержанием хромофорных элементов мы использовали усредненные данные для мест посадок космических аппаратов серий «Сервейер», «Луна» и «Аполлон» (Вуд, 1975; Кинг, 1979; Мейсон, Мелсон, 1973; Нава, Филпоттс, 1979; Финней и др., 1975; Флоренский и др., 1981; Taylor, 1972). Мы не использовали данные АМС «Луна-24», поскольку место посадки этой станции не является представительным для данного района (Ryder et al., 1977). Для некоторых мест посадок КА «Аполлон» (в тех случаях, когда астронавтам, благодаря наличию лунного автомобиля, удавалось собирать образцы в разной местности) удается получить данные, соответствующие морским и материковым районам. Здесь уместно отметить, что по материалам КА «Клементина» удастся даже делать привязку оптических данных к местам отбора грунта по маршруту движения лунных автомобилей в экспедициях «Аполлон-15 и -17» (Blewett et al., 1997).

На рис. 1 и 2 представлены калибровочные оптико-химические зависимости для следующих пар параметров: $(\text{FeO} + \text{TiO}_2) - \text{comb}$ и $\text{TiO}_2 -$

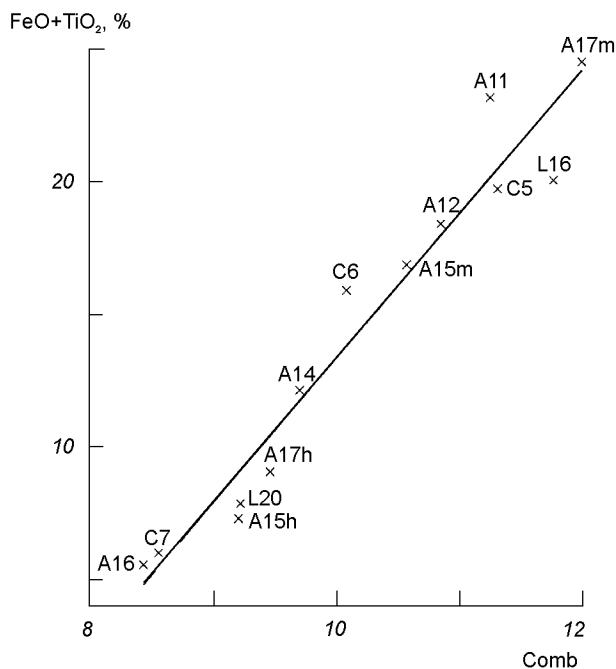


Рис. 2. Зависимость содержания $\text{FeO} + \text{TiO}_2$ от параметра $\text{comb} = k(0.65)10^4 + 5D_k(0.95)$ для мест посадки КА «Аполлон», «Луна» и «Сервейер»

$C_k(0.42/0.65)$. Несмотря на малочисленность данных (13 точек) зависимости представляются убедительными — линейный регрессионный анализ дал в обоих случаях коэффициент корреляции 0.97. Отметим, что даже точка, отвечающая месту посадки «Аполлон-16» (это незрелый грунт), хорошо ложится на общую зависимость; для параметров TiO_2 и $C(0.41/0.56)$ (здесь $C(0.41/0.56)$ — обычный показатель цвета) эта точка сильно отклоняется (Charette et al., 1974).

Описываемые калибровочные зависимости использовались для построения карт распределения TiO_2 и FeO по видимому полушарию Луны (рис. 3 и 4). Было также получено распределение степени зрелости лунного реголита (рис. 5). К сожалению, из-за отсутствия соответствующих калибровочных данных это распределение пока не может быть представлено в виде карты параметра I_s/FeO . Карты на рис. 3 и 4, а также изображение на рис. 5, представлены в прямой ортографической проекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение железа по видимому полушарию Луны имеет ярко выраженный бимодальный характер (возможно даже наличие слабой третьей моды).

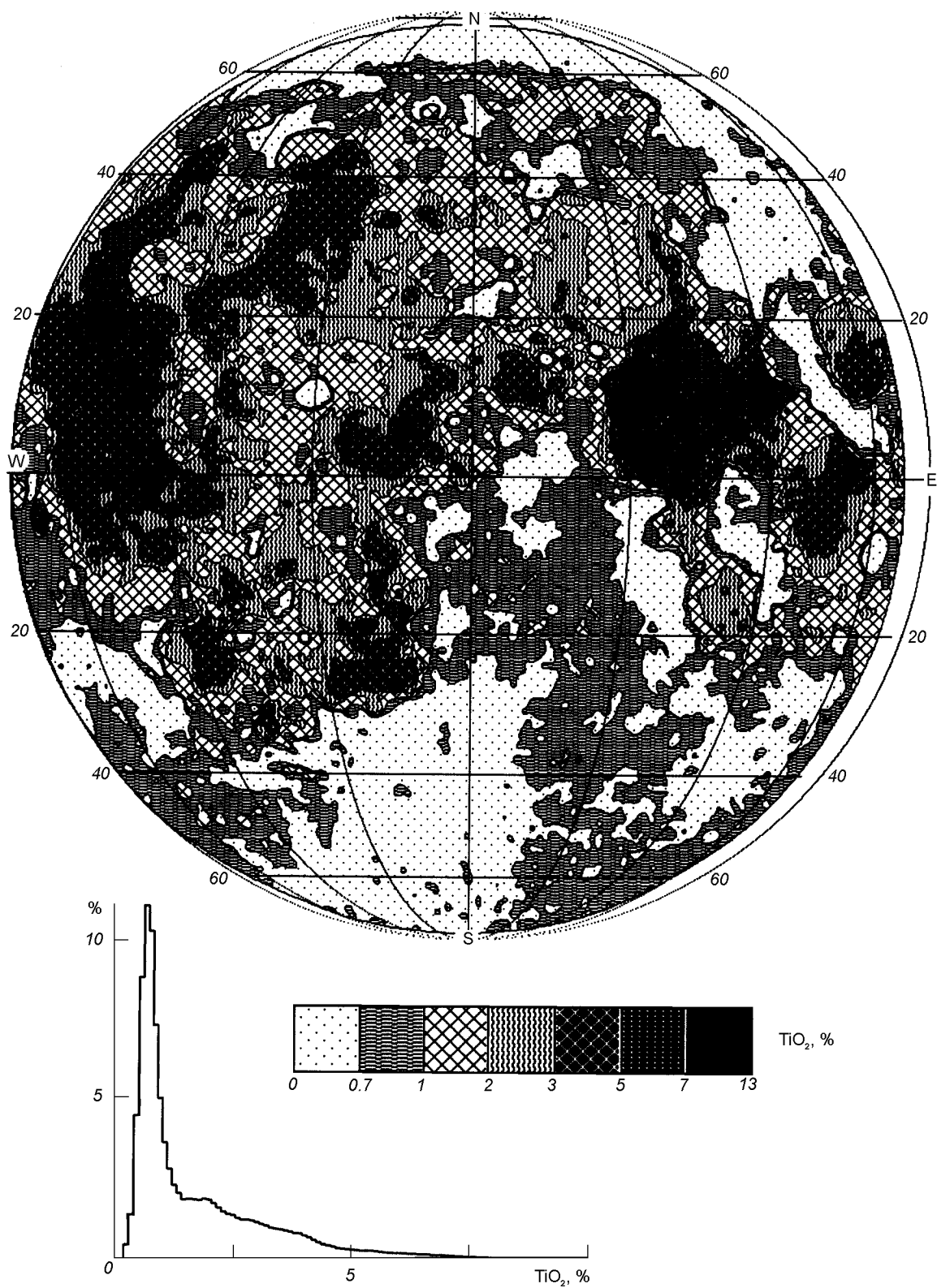


Рис. 3. Карта содержания титана в реголите поверхности видимого полушария Луны и гистограмма распределения

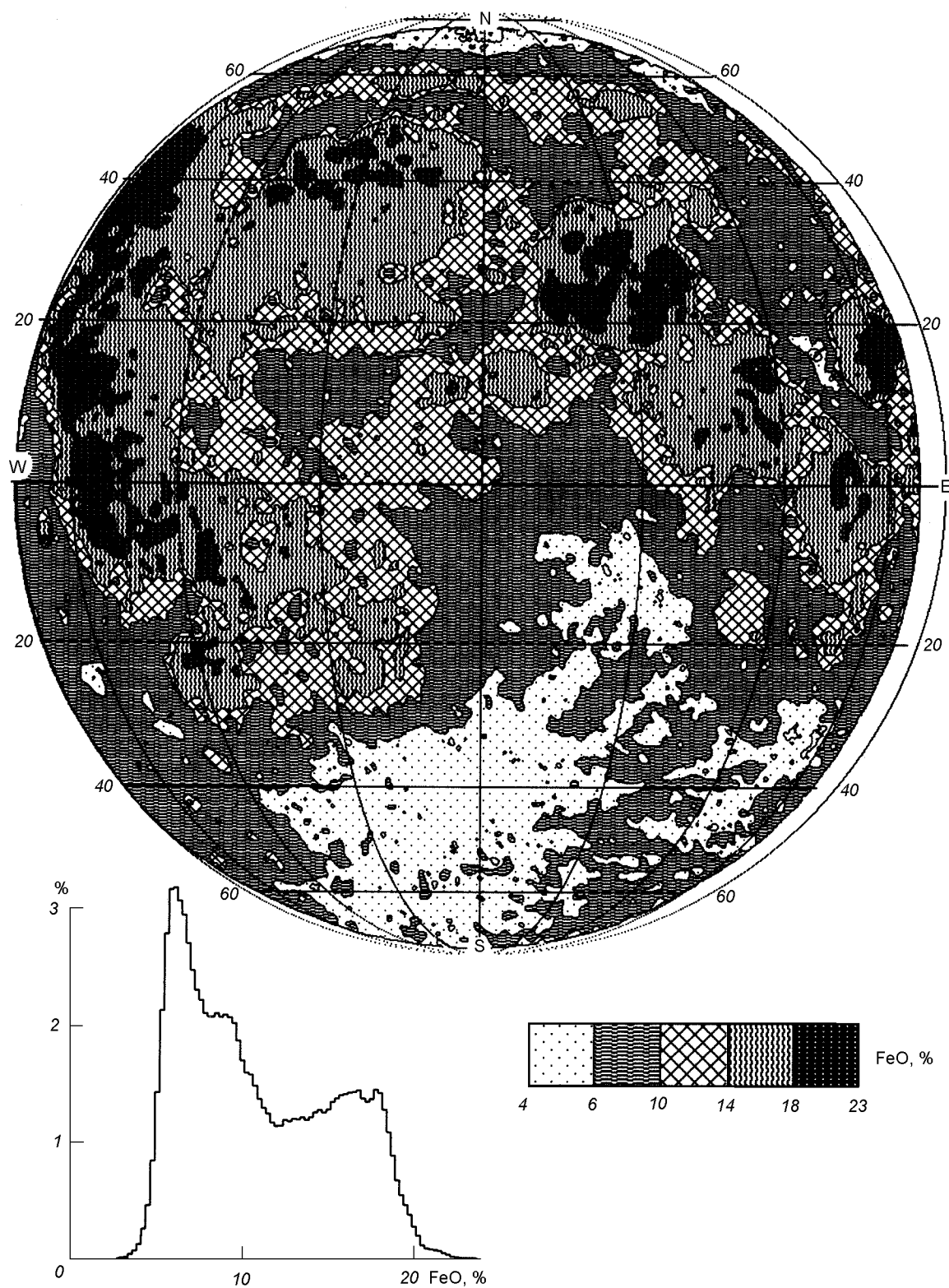


Рис. 4. Карта содержания железа в реголите поверхности видимого полушария Луны и гистограмма распределения

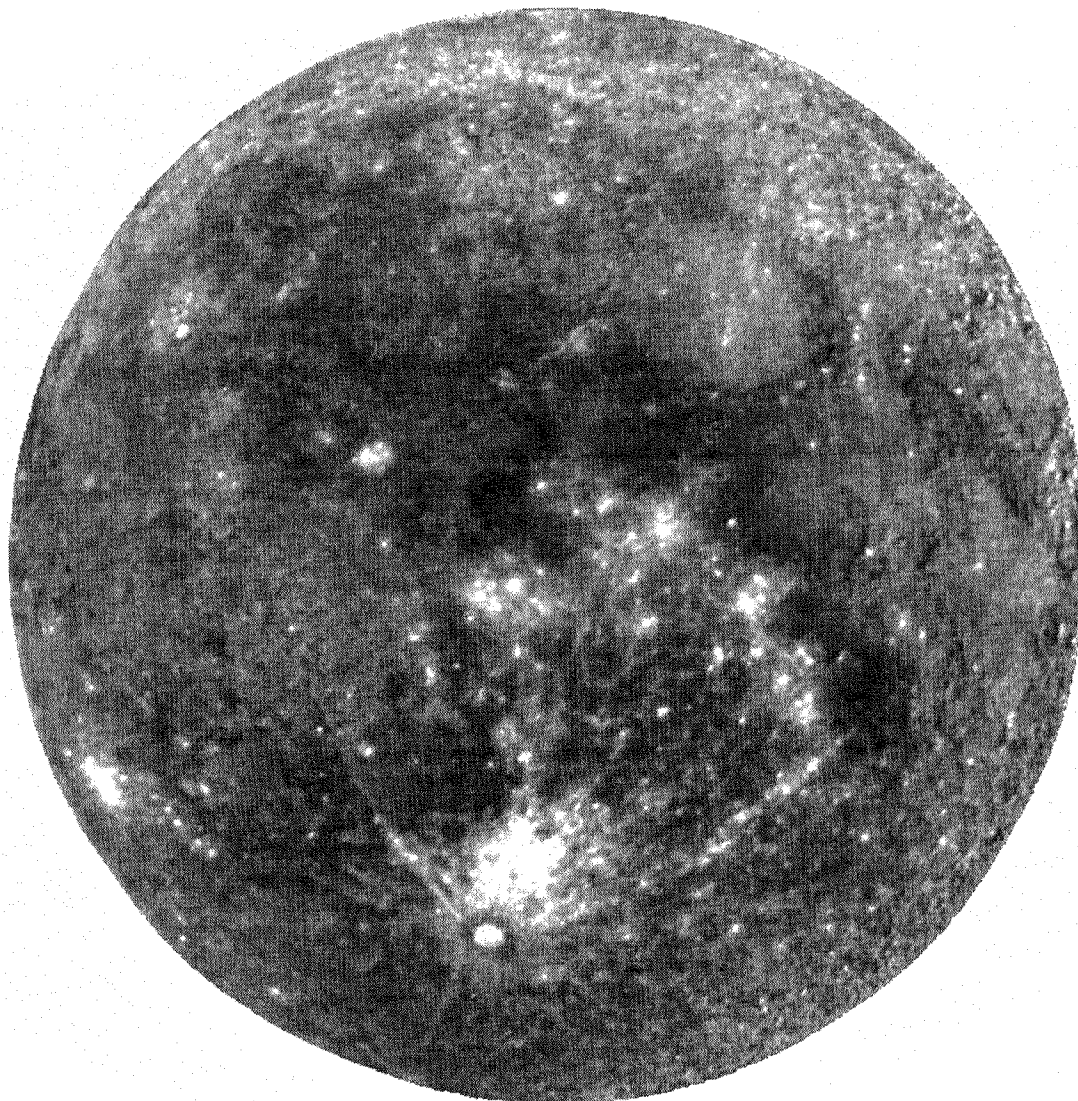


Рис. 5. Распределение степени зрелости реголита видимого полушария Луны

Это видно из гистограммы распределения, представленной на рис. 4. Максимум моды, отвечающей низкому содержанию железа, расположен вблизи 6 %, что хорошо согласуется с данными для поверхности видимого полушария Луны, полученным по данным КА «Клементина» (Lucey et al., 1997). Положение второй моды в нашем случае заметно смещено в сторону больших значений — 17 % против 10 %, получившихся в работе (Lucey et al., 1997). Слабая третья мода центрируется вблизи 8 %. Области с наименьшим содержанием железа расположены на южном материке и формально ассоциируются с зоной выбросов кратера Тихо. Однако, детальное сравнение картины лучевой си-

стемы этого кратера с выделившейся областью на карте содержания FeO не показывает хорошего совпадения. Вероятно, здесь мы все же имеем дело с химической неоднородностью материка, а не с остаточным влиянием фактора незрелости материала. Области с наибольшим содержанием железа в основном расположены на западе в Океане Бурь, а на востоке в Море Ясности. Следует отметить, что в Море Спокойствия (несмотря на его сравнительно низкое альбедо) не очень много районов с высоким содержанием железа.

Гистограмма распределения титана весьма несимметрична, но одномодальна (см. рис. 3). Максимум распределения расположен примерно на

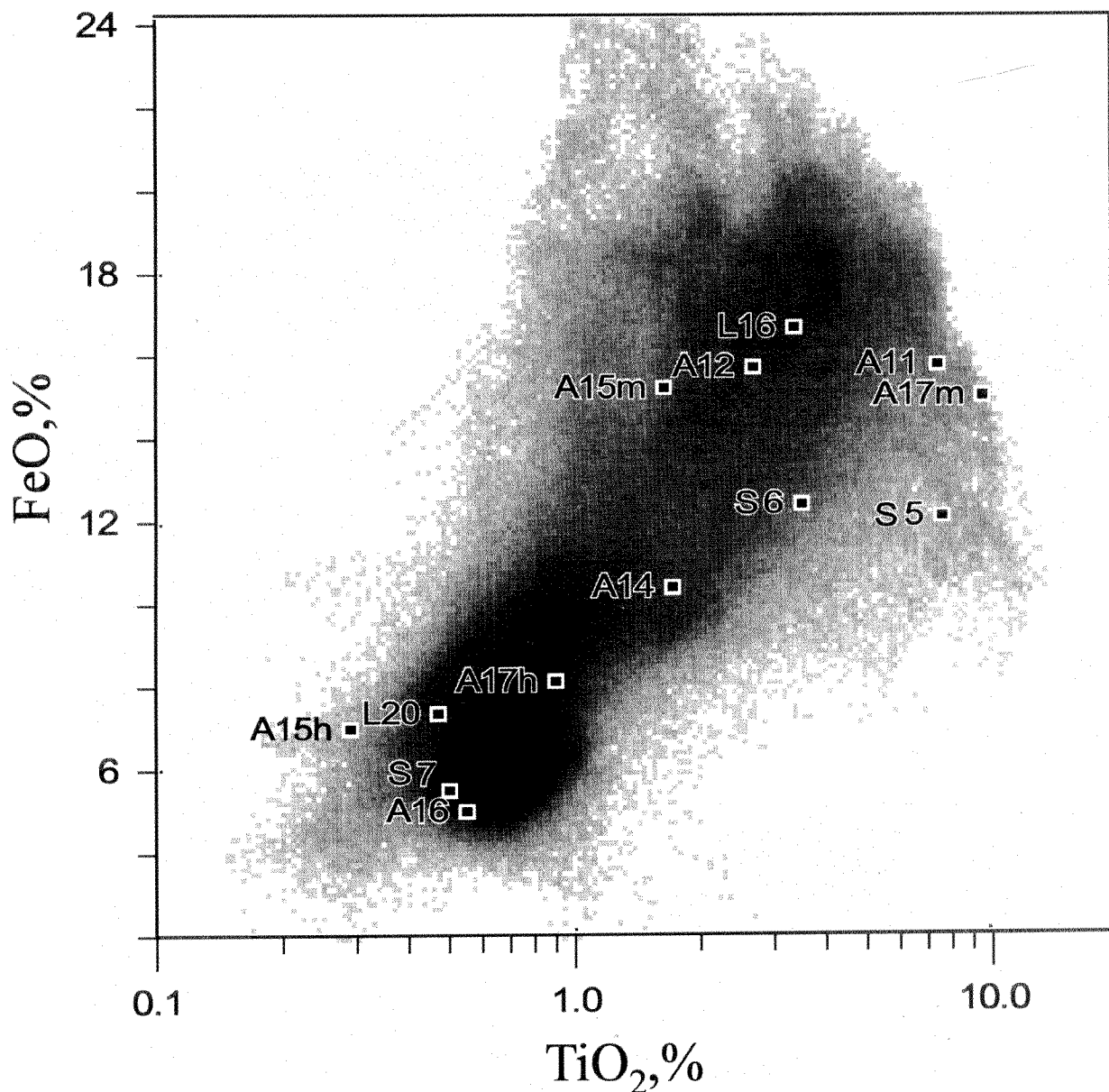


Рис. 6. Диаграмма FeO—TiO₂ для видимого полушария Луны и соответствующие данные для мест посадок космических аппаратов

0.7 %, т. е. большая часть поверхности видимого полушария Луны сложена материалом с низким содержанием титана. Особенно низко это содержание в областях южного и северо-восточного материка. Очень высока концентрация титана (до 13 %) в западной части Моря Спокойствия. Отметим, что поверхность, образованная этими высокотитанистыми лавами, является согласно карте (Воссе, Jonson, 1978) сравнительно старой. Карты, представленные на рис. 3 и 4, неплохо согласуются с опубликованными ранее аналогичными картами,

построенными другим способом (Шкуратов и др., 1996), поэтому все выводы, сделанные нами ранее об особенностях распределения типов пород по лунной поверхности с использованием классификации Богатикова и др. (1985), остаются в силе. Существенные отличия могут наблюдаться лишь для областей с низким содержанием железа и титана. Для таких областей методика, рассмотренная нами ранее (Шкуратов и др., 1996), неприменима — она не учитывает влияние зрелости на альbedo и цвет лунных пород.

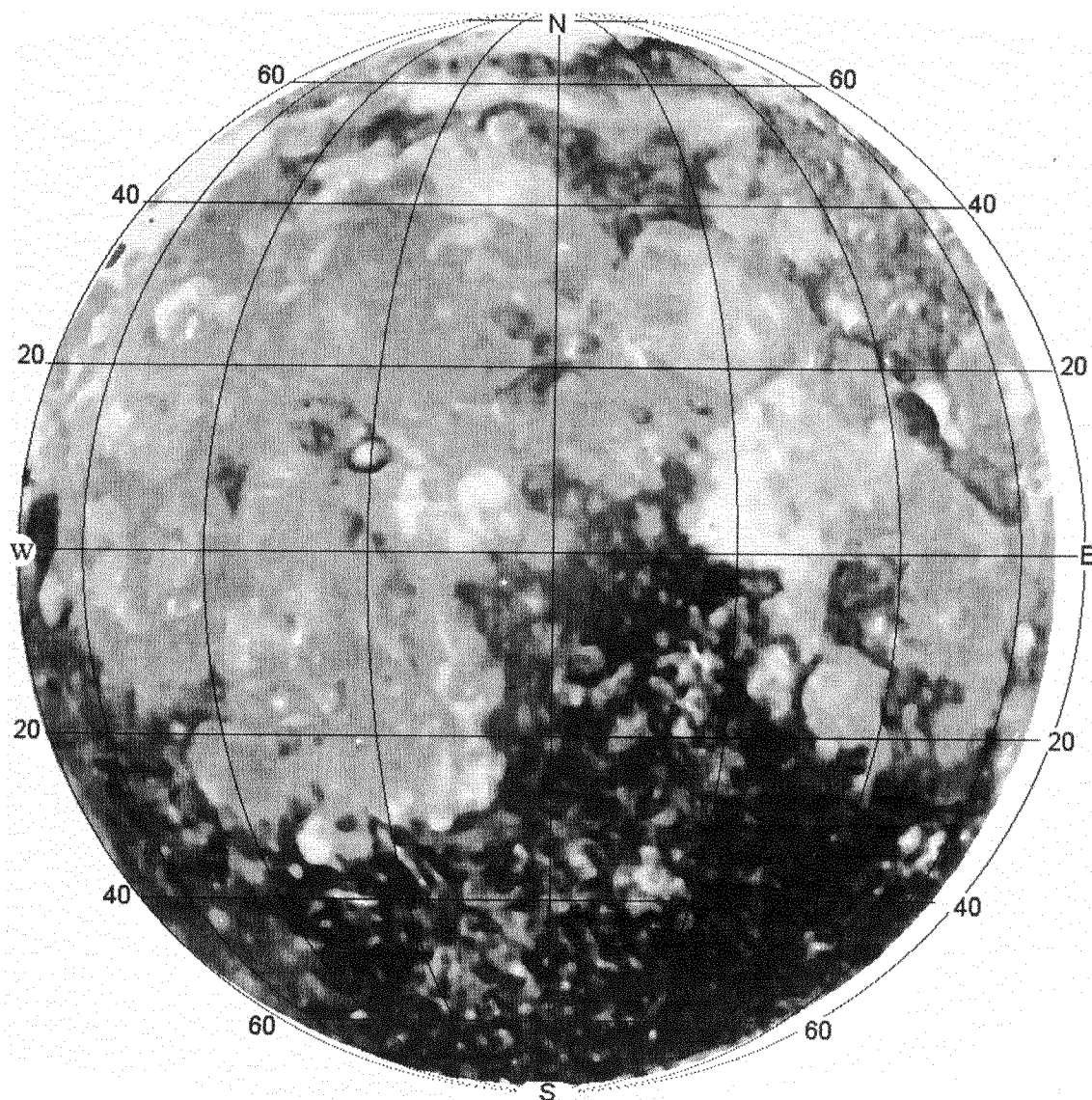


Рис. 7. Карта типичности лунных пород по содержанию железа и титана в реголите поверхности видимого полушария Луны

На изображении, передающем распределение степени зрелости лунного реголита (в относительных единицах), светлые тона отвечают меньшей зрелости (см. рис. 5). На этом изображении хорошо видны молодые кратеры и их зоны выбросов (незрелый грунт). Наиболее ярким примером может служить кратер Тихо. Заметно выделяется кратер Коперник, но при этом зона его выбросов совершенно не видна. Этот кратер заметно старше кратера Тихо. Вероятно материал его выбросов успел «созреть» и перемешаться с материалом подложки. Однако, внутри самого кратера, за счет существо-

вания достаточно сложного сравнительно крутосклонного рельефа, процессы переноса материала могли приводить к обновлению поверхности — вскрытию незрелого грунта. Граница море/материк на изображении практически повсеместно отсутствует. При этом хорошо выделяется область повышенной зрелости, включающая береговую полосу Моря Ясности (юго-западная часть) и Моря Спокойствия (западная часть); в нее почти целиком попадает Море Нектара. К сожалению, у нас пока нет надежных данных для представления изображения, передающего распределение степени зрело-

сти в величинах I_s/FeO . Однако, основываясь на данных работы (Fischer, Pieters, 1995), в которой предпринята попытка связать эту величину непосредственно с показателем цвета $C(0.95/0.75)$, мы можем утверждать, что в первом приближении используемые относительные значения, пропорциональны величине I_s/FeO .

Представляет интерес исследование корреляции между содержанием железа и титана по полученным распределениям. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 6 («титановая» шкала дана в логарифмическом представлении). На этом же рисунке нанесены данные для мест посадок космических аппаратов. Из рис. 6 видно, что исследуемая корреляция довольно хорошо выражена. Коэффициент корреляции равен 0.81. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\lg(\text{TiO}_2 [\%]) = 0.06 (\text{FeO} [\%]) - 0.54.$$

На диаграмме «железо—титан» четко выделяется мощный материковый кластер. Он практически не имеет структуры. «Морская» часть диаграммы имеет более размытый и клочковатый вид — здесь можно выделить несколько слабых кластеров. Интересно отметить, что среди имеющихся точек, отвечающих данным для мест посадок космических аппаратов, только данные для КА «Аполлон-12» и «Луна-16» попадают в области кластеров и в этом смысле могут рассматриваться как примеры типичного грунта по комбинации железа и титана. Все другие аппараты привезли грунт недостаточно типичный для видимого полушария Луны.

В развитие задачи оценки типичности состава лунной поверхности, нами было построено изображение, каждой точке которого присвоено значение, взятое из корреляционной диаграммы «железо—титан»; это значение берется, в соответствии с отсчетами в этой точке FeO и TiO_2 (Шкуратов и др., 1996). На рис. 7 представлена карта типичности комбинаций количеств FeO и TiO_2 . Темным тонам соответствуют здесь более вероятные комбинации. Согласно этой карте, наиболее типичные комбинации встречаются в области южного материка. Базальты западной части Моря Спокойствия, содержащие большое количество титана, при сравнительно низкой концентрации железа, не являются типичными для видимого полушария Луны. Обращает на себя внимание «исчезновение» лучевой системы кратера Коперник; эта система столь же типична, как и окружающие морские участки.

Пространственное разрешение представленных карт несколько выше среднего разрешения данных, которые планируется получить с помощью КА «Лунар Проспектор». Однако, они вполне подходят для сопоставлений. При выполнении таких сопо-

ставлений прежде всего следовало бы выяснить, действительно ли зона выбросов кратера Тихо является областью с более низким содержанием железа и титана, чем ее окрестности. Следует также обратить внимание на распределение этих элементов в Море Спокойствия — действительно ли там аномально много титана при сравнительно небольшом содержании железа. Кроме того, представляется целесообразным провести детальный сравнительный анализ в областях с аномально высокой степенью зрелости. Это позволит убедиться в том, что эти области, хорошо видимые на изображении, представленном на рис. 5, не являются артефактами и не связаны, например, с аномально низким содержанием железа (это фактор, который может заметно влиять на глубину полосы поглощения в области 1 мкм).

Еще раз подчеркнем, что при сопоставлении оптических данных и результатов гамма-спектро스코пии надо иметь в виду, что в первом случае толщина «рабочего» слоя поверхности составляет первые десятки микрон, а во втором — первые метры. Поэтому расхождения, которые будут обнаружены, следует интерпретировать с осторожностью, имея в виду, что они могут быть вызваны как ошибками измерений, так и быть связанными с существованием в некоторых местах вертикальных неоднородностей реголитового слоя.

- Акимов Л. А. О распределении яркости по диску Луны и планет // Астрон. журн.—1979.—56.—С. 412—418.
- Богатиков О. А., Гоньшакова В. И., Фрих-Хар Д. И. Классификация лунных магматических пород. — М.: Недра, 1985.—72 с.
- Вуд Дж. А. Обзор типов лунных пород и сравнение лунной и земной коры // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975.—С. 29—45.
- Евсюков Н. Н. Связь оптических характеристик с химико-минералогическим составом лунных пород // Астрон. журн.—1974.—51.—С. 1316—1325.
- Евсюков Н. Н., Шестопалов Д. И. О минералогическом составе лунных пород // Астрон. вестн.—1978.—12, № 1.—С. 18—26.
- Кинг А. Космическая геология. — М.: Мир, 1979.—379 с.
- Кислюк В. С., Шкуратов Ю. Г., Яцків Я. С. Космічні дослідження Місяця: задачі, можливості і перспективи української науки і техніки // Косміч. наука і технол.—1996.—2, № 1—2.—С. 3—14.
- Мейсон Б., Мелсон У. Лунные породы. — М.: Мир, 1973.—165 с.
- Нава Д. Ф., Филпоттс Д. А. Модель дифференциации Луны в свете новых данных о химическом составе реголита «Луны-20» и «Аполлона-16» // Грунт из материкового района Луны // Под ред. В. Л. Барсукова. — М.: Наука, 1979.—С. 337—344.
- Немошкленко В. В. Дослідження місячного реголіту // Косміч. наука і технол.—1996.—2, № 1—2.—С. 16—23.
- Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г., Кайдаш В. Г. Колориметрическое картографирование видимого полушария Луны // Астрон. вестн.—1996.—30, № 5.—С. 398—408.

- Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
- Розенберг Г. В. Физические основы спектроскопии светорассеивающих веществ // Успехи физич. наук.—1967.—91, № 4.—С. 569—608.
- Старухина Л. В., Шкуратов Ю. Г. Модель спектральной зависимости альbedo многокомпонентных реголитоподобных поверхностей // Астрон. вестн.—1996.—30, № 4.—С. 299—306.
- Финней В., Уорнер Дж., Симмондс К. Типы лунных материковых пород и их отношение к процессам ударного фракционирования // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975.—С. 54—88.
- Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Бурба Г. А. и др. Очерки сравнительной планетологии. — М.: Наука, 1981.—328 с.
- Шкуратов Ю. Г. Модель спектрального хода альbedo твердых поверхностей космических тел // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 5.—С. 39—46.
- Шкуратов Ю. Г. Интерпретация колориметрических характеристик поверхности Луны на основе модели спектрального хода альbedo порошкообразных поверхностей // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—4, №2.—С. 17—21.
- Шкуратов Ю. Г., Кайдаш В. Г., Опанасенко Н. В. и др. Возможность прогнозирования состава лунной поверхности по данным оптических измерений // Космич. наука і технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 78—88.
- Belton M. J., Head J. W., Pieters C. M., et al. Lunar impact basins and crustal heterogeneity: new western limb and far side data from Galileo // Science.—1992.—255.—P. 570—576.
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., et al. Clementine images of the lunar sample-return station: improvements to the TiO₂ mapping technique // Lunar and Planet. Sci. 28th (Abstracts). — LPI Houston, 1997a.—P. 119.
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., et al. FeO mapping of the Moon: refinement using images of the sample-return stations // Lunar and Planet. Sci. 28th (Abstracts). — LPI Houston, 1997b.—P. 121.
- Boyce J., Jonson D. Age of flow units in the lunar nearside maria based on Lunar Orbiter V photographs // Proc. Lunar Planet. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 3275—3284.
- Charette M., McCord T. B., Pieters C., et al. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils // J. Geophys. Res.—1974.—79.—P. 1605—1613.
- Fischer E., Pieters C. Composition and exposure age of the Apollo 16 Cayley and Descartes regions from Clementine data: normalizing the optical effect of space weathering // J. Geophys. Res.—1996.—101E, N 1.—P. 2225—2234.
- Johnson T. V., Soderblom L. A. Relative spectra (0.4—1.1 μ) of the lunar landing site Apollo 7 // J. Geophys. Res.—1969.—74, N 25.—P. 6046—6056.
- Johnson T. V., Saunders S., Matson D., Mosher J. A TiO₂ abundance map for northern maria // Proc Lunar Sci. Conf. 8th. — LPI Houston, 1977.—P. 1029—1036.
- Johnson J. R., Larson S. M., Singer R. B. Remote sensing of potential lunar resources. I. Near-side composition properties // J. Geophys. Res.—1991.—96E, N 3.—P. 18861—18882.
- Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon // Science.—1995.—268.—P. 1150—1153.
- Lucey P., Blewett D., Johnson J. Lunar titanium content from UV-VIS measurements // Lunar and Planet. Sci. Conf. 27th (abstracts). — LPI Houston, 1996.—P. 781.
- Lucey P., Blewett D. Some issues related to lunar FeO and TiO₂ multispectral mapping // Lunar and Planet. Sci. Conf. 28th (abstracts). — LPI Houston, 1997.—P. 841.
- Lucey P., Taylor G., Malaret E. Global abundance of FeO on the Moon: improved estimates from multispectral imaging and comparisons with the lunar meteorites // Lunar and Planet. Sci. Conf. 28th (abstracts). — LPI Houston, 1997.—P. 849.
- Morris R. Surface exposure indices of lunar soils: A comparative FMR study // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 7th. — LPI Houston, 1976.—P. 315—335.
- Morris R. V. The surface exposure (maturity) of lunar soils: Some concepts and I_s/FeO compilation // Proc. Lunar Sci. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 2287—2297.
- Nozette S., Plesance L. P., Horan D. M., et al. The Clementine mission to the Moon: science overview // Science.—1994.—266.—P. 1835—1862.
- Opanasenko N. V., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G. Estimations of iron content in lunar regolith by measurements of spectral slope in 0.95 μ m absorption band // Abstr. of papers subm. to 24th Russian-American microsymp. on planet, October 1996. — Moscow: Vernadsky Inst.—P. 70—71.
- Pieters C., McCord T. Characterization of lunar mare basalt types // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. — LPI Houston, 1976.—P. 2677—2690.
- Pieters C. A summary of spectral reflectance data // Proc. Lunar Sci. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 2825—2849.
- Ryder J., McEwen H. G., Marvin U. B. Basalts from Mare Crisium // The Moon.—1977.—17.—P. 263—287.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Kreslavsky M. A. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 1. Negative polarization // Icarus.—1992.—95.—P. 282—299.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 2. Positive polarization // Icarus.—1992.—99.—P. 468—484.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Stankevich D. G. Lunar soil maturity determination on the base of spectra slope measurements in 0.95 μ m band // Abstr. of papers subm. to 24th Russian-American microsymp. on planet, October 1996. — Moscow: Vernadsky Inst.—P. 86—87.
- Taylor S. Lunar science: Post Apollo Era. — N. Y., 1972.—370 p.

PROGNOSIS OF IRON AND TITANIUM DISTRIBUTIONS ON THE LUNAR SURFACE FOR COMPARISON WITH THE «LUNAR PROSPECTOR» DATA

Yu. G. Shkuratov, V. G. Kajidash, N. V. Opanasenko, D. G. Stankevich, and V. G. Parusimov

Lunar nearside maps of iron and titanium distributions were made up. The purpose of this mapping is to compare its results with the data of geochemical survey which is planned in the «Lunar Prospector» mission. The maps are made from optical measurements in four spectral bands: $\lambda\lambda$ 0.42, 0.65, 0.75, 0.95 μ m. To calibrate the maps, the chemical content data for «Apollo», «Luna», «Surveyor» landing sites were used. A model of light scattering was used to go from optical characteristics of scattering medium to substance parameters. The maps are presented in the right orthographic projection. Histograms of the parameters studied were calculated. In particular, the iron distribution is bimodal with maxima at 6 % and 17 %. The iron—titanium correlation diagram was built; analysis of this diagram made with the use of additional landing site data shows that the majority of landing sites belong to nontypical combinations of iron and titanium abundances. The map of typical FeO and TiO₂ content combinations was made up. According to this map, basalts of Mare Tranquillitatis with high titanium content and low iron concentration are not typical for the Moon nearside.

УДК 621.793.7:629.78

Некоторые особенности формирования серебряных покрытий в различных гравитационных условиях

Б. Е. Патон¹, В. Ф. Лапчинский¹, Е. С. Михайловская¹,
А. А. Гордонная¹, В. Н. Сладкова¹, В. Ф. Шулым¹, Л. О. Незнамова²

¹ Институт электросваривания им. Е. О. Патона НАН Украины, Київ

² РКК «Энергия», Россия

Надійшла до редакції 17.06.97

Проведені порівняльні дослідження макронапруг і топографії поверхні срібних покриттів, отриманих за допомогою універсального ручного інструменту конструкції ІЕЗ ім. Є. О. Патона на Землі та у відкритому космосі. Напруги І роду, що виникають в срібних покриттях товщиною 350—500 нм, нанесених на підкладки із сплаву Д16, в земних умовах складають $-30 \div +90$ МПа. Для аналогічних покриттів товщиною 600—800 нм, отриманих у космосі, напруги І роду практично відсутні. Срібні покриття, отримані на навколоземній орбіті, матимуть більший ресурс роботи, ніж отримані на Землі, тому їх доцільно наносити у відкритому космосі.

При осуществлении технологических операций в открытом космическом пространстве требуется широкое использование разного рода покрытий (Патон, 1977; Патон и др., 1984; Никитский, Жуков, 1983; Загребельный и др., 1988). Необходимость применения отражающих, просветляющих и др. покрытий в космосе выделяла даже в последнее время из космической технологии отдельное направление — оптическую технологию (Петровский, Воронков, 1984; Космическая оптика, 1980).

Целый ряд практических задач, связанных с нанесением покрытий в космосе, можно успешно решать с помощью универсального ручного инструмента (УРИ), сконструированного сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. В 1984 г. космонавтами С. Е. Савицкой и В. А. Джанибековым инструмент был испытан в открытом космосе (Лапчинский и др., 1985; Paton et al., 1989). Наряду с осуществлением процессов резки, пайки, сварки материалов были получены образцы с серебряными покрытиями. Основной задачей испытаний была демонстрация широких возможностей самого инструмента, поэтому эксперимент по получению серебряных покрытий нельзя считать вполне корректным. Однако в условиях почти полного отсутствия сведений о свойствах покрытий, полу-

ченных в открытом космосе, даже самая малая информация об этом представляет несомненный интерес. Следует отметить также, что исследования, о которых речь пойдет ниже, были проведены сразу же после окончания эксперимента, однако результаты их, учитывая специфику того времени, находились в закрытых отчетах.

Испарение серебра чистоты 99.99 осуществлялось из молибденовых тиглей с помощью внешнего электронно-лучевого нагрева тигля. На орбите покрытие наносилось при давлении $10^{-4} \div 10^{-5}$ Па и уровне микрогравитации $g = 1 \cdot 10^{-5} g_0$, где g_0 — гравитация на поверхности Земли. На Земле покрытие формировалось в вакуумной камере с давлением остаточной атмосферы $5 \cdot 10^{-2}$ Па. Были получены 2 подложки с покрытием из Ag и соответственно 2 наземных аналога. В качестве подложек размером $240 \times 180 \times 2$ мм использовался листовый прокат из сплава Д16. Перед нанесением покрытия каждая подложка прошла следующие этапы обработки: обезжиривание и травление в щелочном растворе, промывка водой, анодирование: H_2SO_4 180 г/л; $T = 20^\circ\text{C}$; $i = 1.0 \div 1.5$ А/дм²; $u = 18 \div 20$ В, $t = 40$ мин, промывка водой, окраска согласно ТУ 6-14-515-70; окончательная промывка водой, сушка. В результате такой обработки под-

ложки приобрели черный матовый цвет. Исходное направление текстуры проката довольно отчетливо просматривалось визуально.

Настоящая статья содержит сведения о влиянии условий получения Ag-покрытий на величину напряжений I рода σ , параметр решетки a и топографию их поверхности. Определение напряжений I рода в серебряных покрытиях проводилось по изменению смещения пика линии (420) Ag на дифрактограммах, снятых в Со-излучении на установке ДРОН-3 по методике (Баррет, Массальский, 1984). При измерениях имело место сильное уширение линии из-за мелкодисперсной структуры покрытий, что, естественно, несколько снижало точность измерений. Можно считать, что она составляла 20 МПа при определении напряжений I рода. Ошибка измерения параметра решетки составляла 0.00014 нм.

В таблице представлены значения σ (средние для 10 образцов) и параметра решетки a в Ag-покрытиях, полученных с помощью УРИ при разных уровнях гравитации.

Значения напряжений I рода и параметр решетки

Номер	Условия получения	$\sigma \pm \Delta\sigma$, МПа	a , нм	$a_{\text{табл}} - a$, нм
1	космос	-16 ± 20	0.40833	0.00027
2	космос	$+25 \pm 20$	0.40805	0.00055
3	Земля	$+72 \pm 20$	0.40770	0.00090
4	Земля	-52 ± 20	0.40800	0.00060

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в покрытиях, полученных в космосе и на Земле, есть как сжимающие, так и растягивающие напряжения, что является скорее всего результатом сильно выраженного рельефа исходной подложки.

Однако по абсолютной величине напряжения I рода в покрытиях, полученных на Земле, составляют $-30 \div +90$ МПа, а в покрытиях, полученных в космосе, находятся в пределах ошибки измерения.

Из приведенных в таблице результатов видно также, что параметр решетки Ag-покрытий, полученных в космосе, меньше отличается от табличного значения, чем таковой для покрытий, нанесенных на Земле. Табличное значение параметра решетки серебра составляет 0.40860 нм.

Изучение топографии поверхности Ag-покрытий проводилось на сканирующем электронном микроскопе СЭМ-515. Образцы размером 10×10 мм вырезали с помощью ножниц типа гильотины. На фотографиях, приведенных на рис. 1, видно, что, испытывая деформационное воздействие при резке, покрытия в местах, прилегающих к краю образцов,

разрушаются. Однако характер разрушения покрытий, нанесенных в космосе и на Земле, различен. В покрытиях, нанесенных на Земле (рис. 1, а), наблюдается густая сеть трещин, имеются многочисленные сколы участков покрытия. Серебряные покрытия, нанесенные в космосе, при резке не имеют сколов вплоть до самого края образца (рис. 1, б, в), а образуемые трещины распространяются преимущественно по параллельным линиям. Поверхность покрытий, полученных в космических условиях, повторяет рельеф подложки (рис. 2, б). На фотографии, выбранной из большого числа подобных, видна исходная текстура подложки. В аналогичных покрытиях, полученных на Земле, этого не наблюдается (рис. 2, а). Причем воспроизведение рельефа подложки у серебряных покрытий, полученных в космосе, имеет место при толщинах ($600 \div 800$ нм) — больших, чем у соответствующих покрытий, полученных в земных условиях ($350 \div 500$ нм). Уже отмечалось (Лукаш и др., 1985), что при одинаковых режимах испарения покрытия, нанесенные в космосе, имеют толщину большую, чем их земные аналоги, из-за большей скорости испарения материала в условиях невесомости. Толщина покрытий, исследуемых в настоящей статье, оценивалась по поперечным шлифам.

Для серебряных покрытий, полученных в земных условиях, характерно также и то, что трещины при его разрушении имеют характер скола (рис. 3, а), а у аналогичных покрытий, полученных в условиях космоса — характер вязкого разрушения (рис. 3, б). Иллюстрация характера разрушения Ag-покрытий, полученных в космосе и на Земле, подтверждает вывод о том, что покрытия, полученные в условиях невесомости, менее напряжены.

Трудно с полным обоснованием назвать причину наблюдаемых отличий свойств Ag-покрытий, полученных в различных гравитационных условиях, из-за отсутствия контроля многих параметров при проведении эксперимента. Можно, однако, предположить, что, так как испаряемый материал при формировании покрытия вначале длительное время пребывает в жидкой фазе, затем переходит в паровую фазу и, наконец, конденсируется на подложке в виде твердой пленки, то среда, а также скорость осаждения, толщина покрытия, температура подложки, энергия конденсирующихся частиц (Стеценко и др., 1983) и их взаимодействие существенно влияют на свойства получаемых покрытий. Показано (Черемской и др., 1990), что субмикропористость Ag-покрытий, полученных в космосе меньше, чем у соответствующих им земных аналогов. Распределение субмикропор по размерам в космических образцах более однородно, чем в наземных. Поскольку напряжения I рода, являясь макронап-

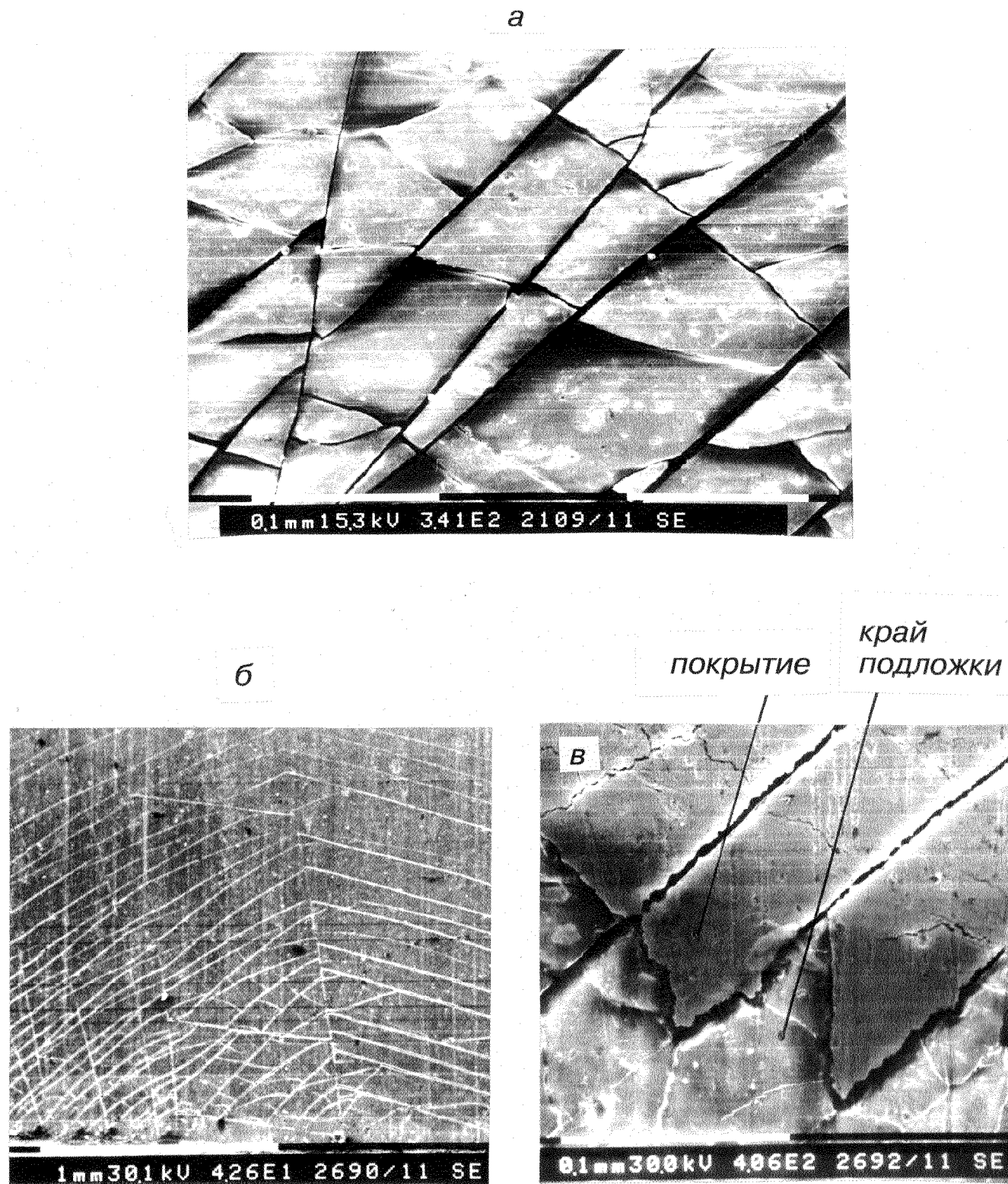
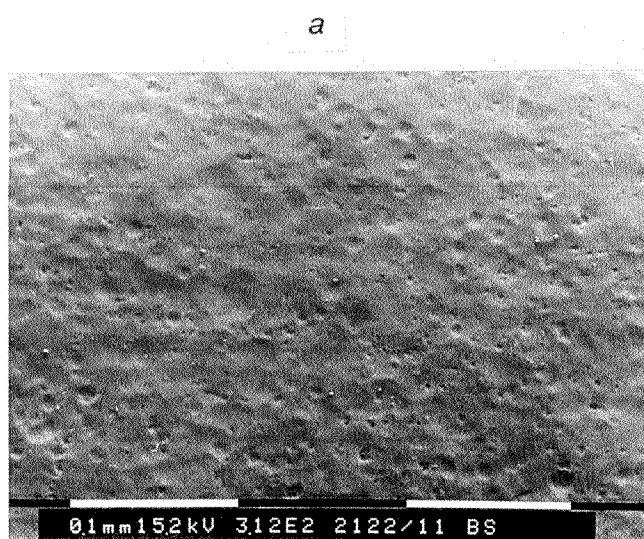
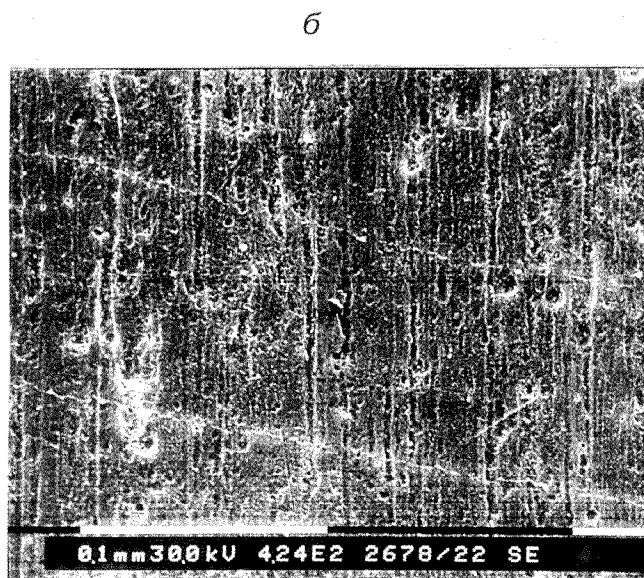


Рис. 1. Топография поверхности серебряных покрытий, нанесенных с помощью УРИ на Земле (*a*) и в космосе (*б, в*) (край вырезанных для исследования образцов)



Толщина покрытия 350 — 500 нм



Толщина покрытия 600 — 800 нм

Рис. 2. Топография поверхности серебряных покрытий, полученных в наземных (а) и космических (б) условиях

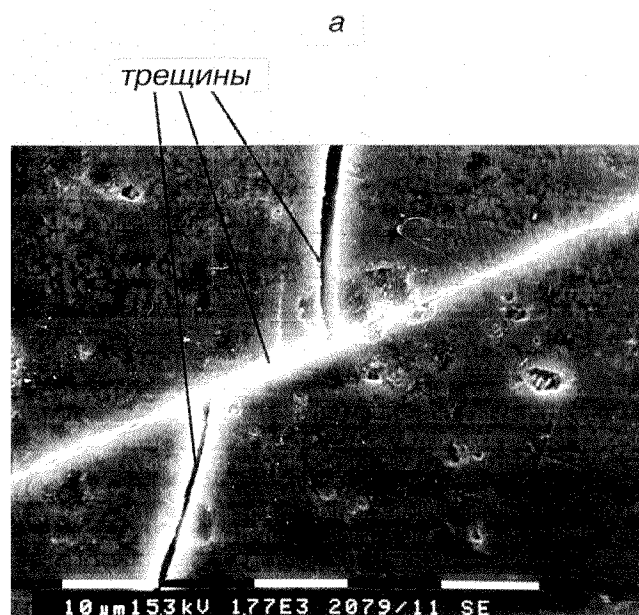


Рис. 3. Характер трещин при разрушении серебряных покрытий, нанесенных на Земле (а) и в космосе (б)

ряжениями, уравниваются во всем объеме исследуемых покрытий, то результаты, полученные в настоящей статье, согласуются с выводами Черемского и др. (1990), так как известно, что (до определенного предела) чем больше в материале дефектов, тем более он напряжен. Образно процесс формирования Ag-покрытий в различных гравитационных условиях можно представить так: силы электромагнитного взаимодействия между атомами серебра под влиянием различных внешних факторов действуют таким образом, что на Земле атомам приходится «втискиваться» в пространство над подложкой, а в космосе они «свободно располагаются».

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Напряжения I рода, которые возникают в Ag-покрытиях толщиной $350 \div 500$ нм, нанесенных с помощью УРИ, в земных условиях на подложки из сплава Д16 составляют $-30 \div +90$ МПа. У аналогичных покрытий толщиной $600 \div 800$ нм, полученных в космосе, напряжения I рода практически отсутствуют.

2. Параметр решетки серебряных покрытий, полученных в условиях космоса, меньше отличается от параметра решетки монокристаллического серебра, чем у земных аналогов.

3. Ag-покрытия, полученные в открытом космосе, воспроизводят рельеф подложки, в отличие от земных аналогов, и при толщинах, больших, чем у соответствующих наземных образцов.

4. При разрушении серебряных покрытий, нанесенных на Земле, трещины имеют характер скола, а у нанесенных в открытом космосе — характер вязкого разрушения.

5. Анализ результатов измерений напряжений I рода, параметра решетки Ag-покрытий и изучение топографии поверхности покрытий позволяют предположить, что серебряные покрытия, полученные в условиях открытого космоса будут иметь больший ресурс работы, чем аналогичные покрытия, полученные на Земле и доставленные в космос транспортным кораблем.

Учитывая вышеизложенное, есть все основания утверждать, что космическая среда более благоприятна для формирования покрытий, чем земная. Авторы поддерживают мнение (Петровский, Воронков, 1984; Bruns et al., 1977) о целесообразности проведения непосредственно в открытом космосе технологических операций, связанных с нанесением покрытий.

Баррет Ч. С., Массальский Т. Б. Структура металлов: Пер. с англ. в двух частях / Под ред. М. Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1984.—Ч. 2.—555 с.

Загребельный А. А., Лукаш Е. С., Никитский В. П. и др. Развитие техники нанесения тонкопленочных покрытий в

натурных условиях // Сборник тр. XXII Чтений, посвящ. разраб. науч. исслед. и развития идей К. Э. Циолковского. — М.: ИИЕТ АН СССР, 1988.—С. 134—138.

Космическая оптика // Тр. IX междунар. конгр. междунар. комиссии по оптике, Санта-Моника, 9—13 окт., 1972 г. / Пер. с англ. А. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1980.

Лапчинский В. Ф., Никитский В. П., Загребельный А. А. и др. Испытание ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе // Проблемы космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 7—15.

Лукаш Е. С., Лапчинский В. Ф. и др. Некоторые результаты анализа образцов покрытий, полученных в космосе // Проблемы космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 81—87.

Никитский В. П., Жуков Г. В. Тонкие пленки в космической технике и технологии // Идеи К. Э. Циолковского и проблемы космического производства: Тр. 18 Чтений, посвящ. разраб. науч. наследия и развития идей К. Э. Циолковского, Калуга, 13—17 сент., 1983. — М., 1984.—С. 78—81.

Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Сварочные процессы в космосе // Сварка и спецэлектрометаллургия. — Киев: Наук. думка, 1984.—С. 121—129.

Патон Б. Е. Проблемы космической технологии // Космическое материаловедение и технология. — М.: Наука, 1977.—С. 5—12.

Петровский Г. Т., Воронков Г. Л. Оптическая технология в космосе. — Л.: Машиностроение, 1984.—158 с.

Стеценко В. В., Мовчан Б. А., Миченко В. А. Структура и отражающие свойства серебряных покрытий, полученных прямым электронно-лучевым испарением и ионным распылением // Проблемы спец. электрометалл.—1983.—Вып. 19.—С. 47—49.

Черемской П. Г., Топтыгин А. Л., Незнамова Л. О. Диагностика объемных микронеоднородностей покрытий, конденсированных в условиях полета орбитальных станций // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики: Тез. докл. V Королевских чтений II респуб. конф. — Киев, 1990.—С. 50—51.

Bruns A. V., Grechko G. M., Gubariev A. A., et al. Orbiting solar telescope on «Saliut-4» station // Acta astronautica.—1977.—4.—P. 1121—1125.

Paton B. E., Djanibekov V. A., Savitskaya S. E., et al. The test of the versatile hand electron beam tool in space. Welding under extreme conditions processing of the international conference under the auspices of the international institute welding. — Helsinki: Pergamon press, 1989.—P. 189—196.

SOME PECULIARITIES OF FORMATION OF SILVER COATINGS UNDER VARIOUS GRAVITATION CONDITIONS

B. E. Paton, V. F. Lapchinskii, E. S. Mikhailovskaia, A. A. Gordonnaia, V. N. Sladkova, V. F. Shulym, and L. O. Neznamova

Microstrains and topography of silver coatings made under ground-based conditions and in the outer space are compared. The coatings were made with the use of a hand-device constructed at the E. O. Paton Electric Welding Institute, Academy of Sciences of Ukraine. First-kind strains arising in silver coatings $350 \div 500$ nm thick on the D16 alloy base are $-30 \div +90$ MPa when the coatings are made under ground-based conditions. Similar coatings $600 \div 800$ nm thick made in the outer space have virtually no first-kind strains. We believe that the silver coatings made in orbiting laboratories will have longer operating time than the coatings made on the Earth.

УДК 536.581.3:681.7.055.33:535.12

Анализ физических моделей влияния иллюминатора криогенной экспериментальной камеры на деформацию волнового фронта

А. И. Беляева, И. В. Камышова

Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, Харків

Надійшла до редакції 22.04.97

Досліджено вплив вхідного ілюмінатора криогенної інтерференційної установки на фронт світлової хвилі. Розроблена методика попереднього теоретичного аналізу та моделювання факторів, які призводять до спотворення хвильового фронту ілюмінатором, а також методика лабораторного контролю готового ілюмінатора, що передусе його установці в експериментальній камері. Вибір головних спотворюючих факторів зумовлений двома характерними режимами експлуатації камери: вакуумним та газонаповненням. Порівняння розрахунків з експериментальними оцінками дозволило впевнитися у слушності запропонованих моделей.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КРИОГЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДАХ

В последние годы быстрое развитие ИК-астрономии обусловило создание охлаждаемых ИК-телескопов и спектральных приборов, размещенных в лабораториях разных стран и на космических аппаратах. Эти приборы должны быть снабжены криогенной системой охлаждения, обеспечивающей необходимую температуру для работы оптических и электронных элементов (Горянкин и др., 1994; Любарский и др., 1994). При проектировании и изготовлении охлаждаемых оптических приборов, узлов и элементов необходимо учитывать изменение свойств применяемых материалов с понижением температуры, т. е. уметь производить криокоррекцию при комнатной температуре (Беляева и др., 1989). С этой целью при создании оптических элементов телескопов, изготавливаемых в производственных условиях, необходимо проводить контроль их рабочих поверхностей при криогенных температурах.

Наиболее важной характеристикой, определяющей качество точных поверхностей, является соответствие формы оптических элементов расчетной.

Возрастающие требования к возможностям оптического оборудования приводят к необходимости повышения качества оптических элементов и жестким допускам на отклонение их формы при охлаждении от расчетной — в пределах $\lambda/15$ — $\lambda/40$ (Амур, 1983). Такие малые отклонения от заданной формы можно обнаружить и измерить с помощью интерференционных методов (Беляева и др., 1988), которые позволяют осуществлять контроль формы оптических деталей с точностью до десятых и даже сотых долей длины волны. Очевидно, что не менее строгие требования должны предъявляться к допускам на неконтролируемые смещения узлов крепления (например, люфты между деталями), перемещения и юстировки оптических деталей интерферометрической установки. При создании подобной установки с криогенным охлаждением испытуемых деталей возникает ряд дополнительных трудностей, обусловленных характерными особенностями криогенной техники, одной из которых является наличие иллюминаторов, деформируемых под влиянием разности давлений внутри и вне вакуумированных объемов или в результате неоднородного охлаждения в газонаполненных криогенных камерах (Шрамко, 1972; Нифонтова и др., 1986), или под воздействием механических нагруз-

зок, возникающих при герметизации иллюминатора (клеевое или через эластичный уплотнитель) и за счет разности в ТКЛР материалов иллюминатора и его оправки. Изменение геометрической формы иллюминатора, а также возникающая анизотропия в распределении механических напряжений внутри объема материала, в свою очередь, приводит к искажению волнового фронта зондирующего излучения при прохождении через иллюминатор. Правильный выбор конструкции криогенной камеры позволяет решать проблемы, связанные с термическими деформациями конструкционных материалов и особенностями теплофизических процессов охлаждения и стабилизации температур оптических деталей. Однако искажения волнового фронта зондирующего оптического излучения интерферометрической установки, вносимые входным иллюминатором камеры, могут быть лишь ослаблены, и в любом случае их вклад в результирующую интерференционную картину должен быть количественно определен и учтен при анализе интерферограммы. Для минимизации этих искажений нужно правильно выбрать материал и габариты иллюминатора, а также свести к минимуму возможную деформацию, связанную с его установкой в корпусе камеры.

Таким образом, для получения достоверной информации о состоянии поверхностей аттестуемых криогенных оптических деталей необходимо создание прочных, надежных и герметичных иллюминаторов, не оказывающих искажающего влияния на волновой фронт проходящего света в условиях вариации температур и давления. В противном случае искажения, вносимые иллюминатором, необходимо выделить и учесть при анализе интерференционной картины. В этой связи принципиально важно понять их природу и возможности их минимизации. Прогресс в этом направлении возможен только при тесном взаимодействии экспериментальных и теоретических методов исследования напряженно-деформационного состояния иллюминатора, возникающего в самых разнообразных условиях, и его влияния на оптические характеристики системы, а также совершенствование технологии крепления иллюминаторов.

Опыт создания стендов, имитирующих рабочие условия для оптики в космосе, крайне ограничен. Сложность задачи заключается в невозможности предложить универсальный стенд. Как правило, испытание каждого конкретного оптического элемента, аттестация модуля или блока требует разработки оригинального стенда (Morrow et al., 1984; Miller et al., 1982; Petrie, 1984; Crowe et al., 1984). Поэтому в настоящее время актуально развитие

методического подхода к решению задачи, анализ элементов стенда и требований к его отдельным деталям.

В рамках программы создания в Украине стендовой экспериментальной базы и методик для обработки элементов и узлов криогенных оптических систем в Физико-техническом институте низких температур НАН Украины был изготовлен уникальный базовый криогенный экспериментальный стенд для испытаний оптических элементов и узлов в условиях, имитирующих космические (Беляева и др., 1993). Созданная камера неуниверсальна, однако предложенная конструкция позволяет мобильно перестраивать ее в соответствии с требованиями текущего эксперимента. В частности, накоплен опыт испытаний оптических элементов и узлов в этой камере как в вакуумном, так и в газонаполненном варианте.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе рассмотрен конкретный иллюминатор, материал (кварц КВ) и диаметр (160 мм, рабочий диаметр 120 мм) которого заданы спецификой решаемой с помощью данной экспериментальной камеры задачи и размерами оптических деталей, подлежащих контролю. Выбор основных искажающих факторов определялся двумя характерными режимами эксплуатации экспериментальной камеры:

1. Испытания оптических деталей проводятся в вакууме (иллюминатор теплый). Вакуумирование внутреннего объема экспериментальной камеры, приводящее к перепаду давлений на поверхностях иллюминатора, вызывает его изгиб в сторону вакуумированного объема. В этом случае важно правильно выбрать толщину иллюминатора (при заданном материале и диаметре).

2. Испытания оптических деталей проводятся в газонаполненной камере (иллюминатор холодный). В этом варианте важно правильно установить иллюминатор в корпусе камеры, сведя к минимуму несоответствие коэффициентов теплового расширения иллюминатора и оправы.

В связи с этим был рассмотрен ряд упрощенных модельных задач, в рамках которых для конкретного иллюминатора проведены оценки:

- напряжений и деформаций, возникающих под влиянием перепада давлений на его поверхностях при различных видах крепления в корпусе камеры;
- искажений плоского волнового фронта света при прохождении через иллюминатор, деформированный под действием перепада давлений;

— температурных напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе под действием неоднородных температурных полей при различных видах крепления;

— напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе при охлаждении из-за несоответствия коэффициентов термического расширения материалов иллюминатора и оправки.

В результате проведенного анализа была определена оптимальная толщина иллюминатора, позволяющая значительно понизить его влияние на волновой фронт при интерференционных исследованиях в вакууме.

Изложена также методика предварительного лабораторного тестирования изготовленного на основе предварительных расчетов иллюминатора, которая по нашему опыту должна предшествовать его установке в экспериментальную камеру. Сравнение расчетов с экспериментальными оценками позволило убедиться в правомерности предложенных моделей.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ИСКАЖАЮЩЕМУ ДЕЙСТВИЮ ИЛЛЮМИНАТОРА НА ВОЛНОВОЙ ФРОНТ

Деформация иллюминатора под действием перепада давлений внутри и вне камеры при ее вакуумировании (иллюминатор теплый). На рис. 1, а показано диаметрально поперечное сечение иллюминатора. При вакуумировании камеры иллюминатор оказывается под действием равномерно распределенной нагрузки $P = 101.325$ кПа, перпендикулярной к его поверхности и приводящей к его изгибу. Согласно гипотезе Кирхгофа (Писаренко, 1986) считаем, что в любом сечении иллюминатора, параллельном срединной плоскости ($z = 0$) нормальные напряжения равны нулю и каждый элемент слоя иллюминатора, параллельного срединной плоскости, при изгибе находится в плоском напряженном состоянии. При этом в каждой точке деформированного иллюминатора возникает два главных напряжения: радиальное σ_r и трансверсальное σ_θ . Распределение этих напряжений зависит от граничных условий на его краях, т. е. от типа крепления иллюминатора в стенке камеры: жесткое защемление иллюминатора по контуру (аналог жесткого клеевого соединения) и шарнирное закрепление по контуру (аналог наличия эластичной кольцевой прокладки). Однако, принимая во внимание конечную жесткость клеевого соединения, делаем вывод о том, что в реаль-

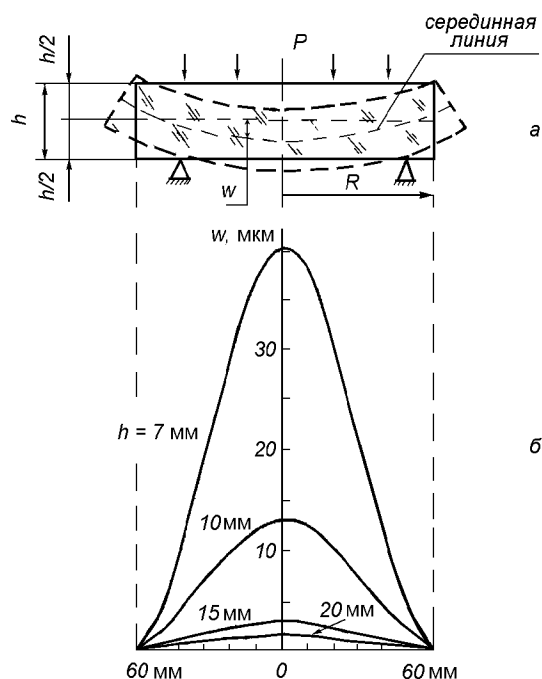


Рис. 1. Схема шарнирного закрепления иллюминатора по контуру: а — поперечное сечение иллюминатора; б — распределение прогиба w по радиусу r пластины иллюминатора для разных ее толщин h

ной конструкции крепления, как правило, реализуется шарнирное крепление края иллюминатора. Поэтому подробно рассмотрим случай шарнирного крепления иллюминатора по контуру (Рудицин и др., 1970) (рис. 1, а).

Главные напряжения, возникающие при таком закреплении в иллюминаторе, определяются выражениями:

у контура —

$$\sigma_r = 0, \quad \sigma_\theta = \pm 0.75(1 - \mu)PR^2/h^2; \quad (1)$$

в центре —

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \pm 0.38(3 + \mu)PR^2/h^2, \quad (2)$$

где h — толщина иллюминатора, r — текущий радиус, $P = 101.325$ кПа — величина давления на иллюминатор, $R = 60$ мм — световой радиус иллюминатора, μ — коэффициент Пуассона.

Для величины прогиба пластины иллюминатора при этой конструкции крепления получено следующее выражение:

$$w = Pr^4/(64D) - PR^2r^2(3 + \mu)/[32D(1 + \mu)] + PR^4(5 + \mu)/[64D(1 + \mu)], \quad (3)$$

где $D = Eh^3/[12(1 - \mu^2)]$ — жесткость, E — модуль Юнга.

На рис. 1, б показано распределение величины

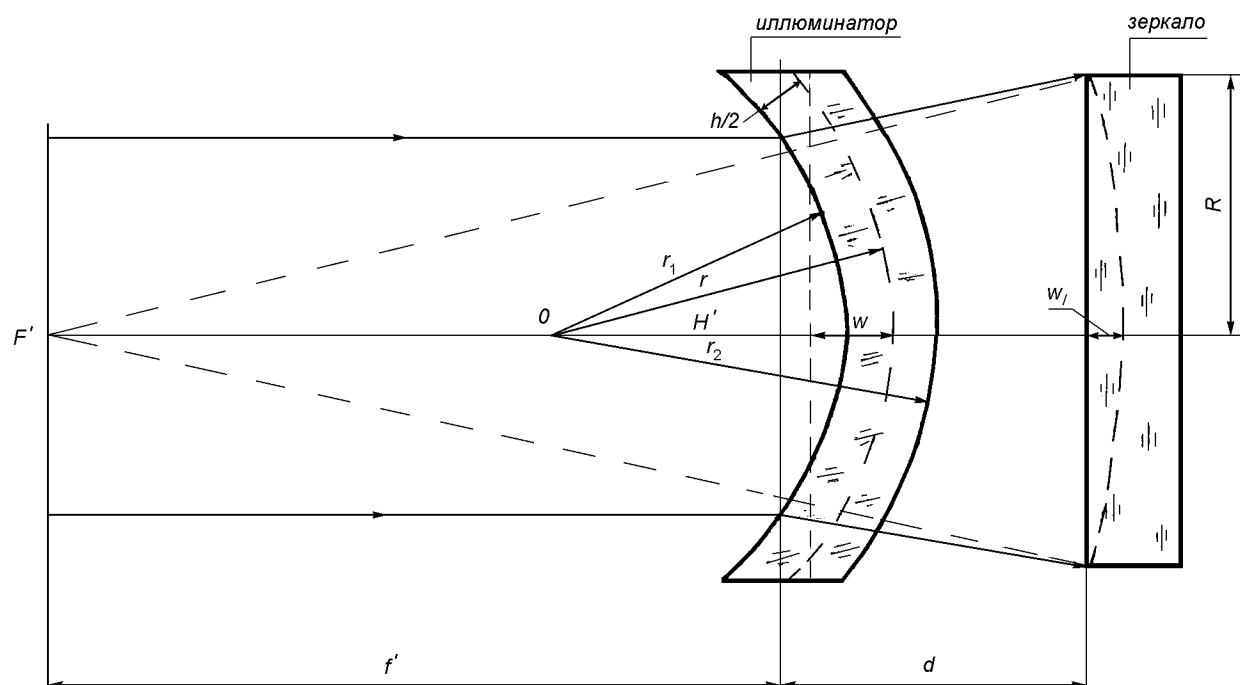


Рис. 2. Деформация волнового фронта световой волны вследствие изгиба иллюминатора под действием разности давлений

прогиба по радиусу пластины для разных ее толщин ($h = 7$ мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм). Максимальное значение достигается в центре пластины ($r = 0$).

Оценка оптимальной толщины пластины иллюминатора. Оптимальная толщина иллюминатора для установки в вакуумной камере выбиралась из сравнения оценок деформации волнового фронта иллюминатором толщиной h с величинами допустимых искажений волнового фронта ($\lambda/15 \div \lambda/40$). Для оценки искажений волнового фронта использовались результаты предыдущего раздела (величины прогиба иллюминатора при различных его толщинах). Определяя степень влияния возникающего прогиба иллюминатора на волновой фронт, мы воспользовались следующими рассуждениями. Для упрощения считаем, что под действием разности давлений плоские поверхности иллюминатора деформируются в сферические (рис. 2). Величины радиусов кривизны этих поверхностей определяются по максимальной величине прогиба $w_{\max}$ срединной линии, полученной из (3):

$$r_1 = r - h/2, \quad r_2 = r + h/2, \quad r = R^2/2w, \quad (4)$$

где r — радиус кривизны срединной линии, r_1 и r_2 — радиусы кривизны внутренней и внешней поверхностей иллюминатора соответственно.

Фокусное расстояние f' центрированной системы сферических оптических поверхностей — в данном случае концентрического мениска — всегда отрицательно (рассеивающая линза) и вычисляется с помощью выражения (Бегунов, 1966)

$$1/f' \sim (n-1)(r_2 - r_1)/(nr_1r_2), \quad (5)$$

где $n = 1.46$ — показатель преломления материала иллюминатора (кварц КВ).

Таким образом, для фокусного расстояния получаем выражение

$$f' \sim -nr^2/[h(n-1)] \sim -nR^4/[4w^2h(n-1)]. \quad (6)$$

Так как $f' \gg d$ (d — расстояние от иллюминатора до зеркала) можно считать, что радиус кривизны волнового фронта в месте расположения зеркала мениска (иллюминатора) $r_1 \sim f'$.

Тогда для определения искажения волнового фронта, которое можно характеризовать величиной w_1 (стрелкой прогиба сферического волнового фронта света, падающего на поверхность аттестуемого зеркала (рис. 2)), было получено выражение

$$w_1 \sim R^2/2f' \sim 2hw^2(n-1)/nR^2. \quad (7)$$

Очевидно, что допустимые значения этой величины должны быть заведомо меньше допустимых искажений, возникающих при взаимодействии све-

товой волны с поверхностями исследуемых элементов (зеркал), т. е. $w_1 \ll \lambda/15 \div \lambda/40$.

Исходя из этих допусков, с помощью условия (7) и с учетом рис. 1, б была определена гарантированная толщина иллюминатора для решения настоящей задачи.

Из соотношений (7) очевидно, что w_1 значительно меньше максимальных значений прогиба w в центре иллюминатора (из-за малости произведений величин h/R и w/R). Для максимальных значений $w_{\max}$ при различных толщинах иллюминатора и рабочей длины волны $\lambda = 0.4$ мкм имеем:

- а) $h = 7$ мм, $w_{\max} = 40.8$ мкм, $w_1 = 0.02$ мкм;
- б) $h = 10$ мм, $w_{\max} = 13.26$ мкм, $w_1 = 0.3 \cdot 10^{-3}$ мкм;
- в) $h = 15$ мм, $w_{\max} = 3.53$ мкм, $w_1 = 0.3 \cdot 10^{-4}$ мкм;
- г) $h = 20$ мм, $w_{\max} = 1.77$ мкм, $w_1 = 0.1 \cdot 10^{-4}$ мкм.

Толщины $h < 10$ мм представляются не пригодными, так как в этом случае величина производной $\Delta w_{\max}/\Delta h > 1$ и резко увеличивается с уменьшением толщины. Нами была выбрана толщина иллюминатора $h = 15$ мм. В этом случае для величины прогиба $w_{\max} = 3.5$ мкм и рабочей длины волны $\lambda = 0.4$ мкм искажения волнового фронта

$$w_1 \sim \lambda/10^4 \ll \lambda/40$$

(для пластин с $h > 15$ мм величина производной $\Delta w_{\max}/\Delta h \ll 1$). Таким образом, изменение формы данного кварцевого иллюминатора под действием перепада давлений в вакуумированной экспериментальной камере не должно приводить к существенным искажениям плоского волнового фронта зондирующего излучения.

Оценка прочности пластины иллюминатора. Для расчета на прочность оценим напряжения, возникающие у контура и на оси симметрии иллюминатора (толщина $h = 15$ мм, иллюминатор шарнирно оперт:

- а) $\sigma_\theta = 0.9$ МПа;
- б) $\sigma_r = \sigma_\theta = 1.8$ МПа.

Известно (Мозберг, 1991), что предел прочности кварцевого стекла при изгибе составляет 40 МПа, а при сжатии — 600 МПа. Таким образом, рассматриваемый кварцевый иллюминатор имеет многократный запас прочности в отношении напряжений, возникающих при вакуумировании камеры. Однако необходимо отметить, что данная оценка справедлива в случае, когда форма иллюминатора и оправки близки к идеальной, так как в противном случае неизбежна локализация и концентрация напряжений с непредсказуемыми последствиями.

Оценка температурных напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе под действием неоднородных полей при различных видах крепления. При испытаниях оптических элементов в газонаполненной камере, иллюминатор которой обдувается теплым газом с целью предохранения от криоосадков, в последнем могут возникнуть значительные градиенты температур по толщине и в радиальном направлении. Для оценки максимальных значений соответствующих температурных напряжений и деформаций рассмотрим следующую модельную задачу (рис. 3). Пусть температура на наружной поверхности иллюминатора ($z = h/2$) равна комнатной T_k , а на внутренней ($z = -h/2$) — температуре жидкого азота T_{N_2} (рис. 3, а), причем изменение температуры по толщине имеет линейный характер (рис. 3, б), а в радиальном направлении градиент температуры отсутствует (это предположение справедливо в случае, когда крепление иллюминатора реализовано таким образом, что отсутствует теплообмен между иллюминатором и боковыми стенками камеры). Очевидно, что при установлении градиента температур каждый плоский слой иллюминатора, параллельный срединной плоскости, стремится деформироваться в соответствии с законами тепловой деформации. Если иллюминатор свободен от за-

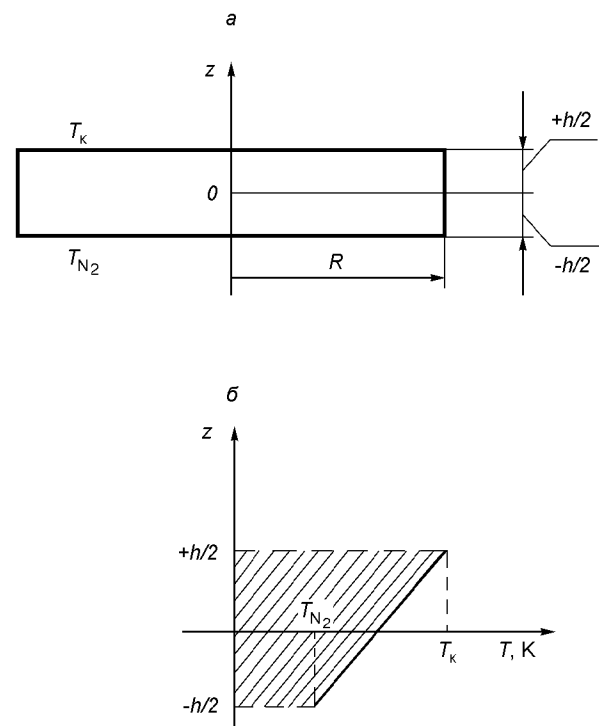


Рис. 3. К оценке температурных напряжений во время работы в газонаполненной камере: а — поперечное сечение иллюминатора; б — изменение температуры иллюминатора по толщине

крепления, то разность диаметров его оснований составит

$$\Delta D = -D\alpha\Delta T, \quad (8)$$

где $\Delta T = T_k - T_{N_2}$ — перепад температур по толщине; D — диаметр диска при T_k ; α — коэффициент линейного расширения.

Плоский иллюминатор примет, таким образом, форму концентрического мениска с центром кривизны в точке 0 и радиусом кривизны r . Величину этого радиуса (при $r \gg h$) легко определить:

$$r = h/(\alpha\Delta T). \quad (9)$$

Плоская поверхность иллюминатора приобретает кривизну со стрелкой

$$w = D^2\alpha\Delta T/(8h), \quad (10)$$

что для данного конкретного иллюминатора ($h = 15$ мм) составит приблизительно 12 мкм. Как следует из выражения (7), это не должно привести к существенному искажению плоского волнового фронта, проходящего через него света и, следовательно, не должно повлиять на интерференцию лучей, отраженных от поверхностей зеркала.

В действительности, однако, иллюминатор закреплен в корпусе камеры и лишен возможности изменять свои размеры в точном соответствии с законами тепловой деформации, что приводит к возникновению температурных напряжений. Для оценки максимальных значений этих напряжений предположим, что иллюминатор сохраняет свою плоскую форму при наличии градиента температур по толщине (этот случай соответствует предельно жесткому креплению иллюминатора). Тогда все слои, перпендикулярные к оси z (рис. 3, б) будут иметь одинаковые диаметры, равные диаметру слоя с температурой $\bar{T} = (T_k + T_{N_2})/2$. При этом слои, имеющие температуру выше $\bar{T}$, будут сжаты, а слои с температурой ниже $\bar{T}$ — растянуты. При симметричном растяжении или сжатии зависимость деформации от напряжения имеет вид:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon = 1/E(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) = (1 - \mu)\sigma/E, \quad (11)$$

где μ , E — коэффициент Пуассона и модуль Юнга. Следовательно,

$$\sigma = E\varepsilon/(1 - \mu). \quad (12)$$

Подставив в это выражение деформацию крайнего теплого слоя ($z = h/2$)

$$\varepsilon = \varepsilon_k = \alpha(T - T_k) = (\alpha/2)(T_{N_2} - T_k),$$

а также крайнего холодного слоя ($z = -h/2$)

$$\varepsilon = \varepsilon_{N_2} = \alpha(T - T_{N_2}) = (\alpha/2)(T_k - T_{N_2}),$$

получим максимальные значения напряжений в иллюминаторе, которые достигаются на его поверхностях:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \pm E\alpha\Delta T/(1 - \mu) = \\ &= \pm E\alpha(T_k - T_{N_2})/[2(1 - \mu)], \end{aligned} \quad (13)$$

где знак «+» относится к растягивающим напряжениям. (Поскольку E и μ слабо зависят от температуры, значения их принимались постоянными и равными значениям при $T = 300$ К для кварцевого стекла). Для рассматриваемого иллюминатора $\sigma_{\max} = 4.7$ МПа, что значительно меньше предела прочности при сжатии — 600 МПа.

В первом приближении можно также показать, что при наличии температурных градиентов как по толщине иллюминатора, так и на его поверхности максимальное напряжение в иллюминаторе будет пропорционально максимальной разности температур в иллюминаторе:

$$\sigma_{\max} = \pm E\alpha\Delta T_{\max}/(1 - \mu). \quad (14)$$

Итак, рассмотрев жесткое крепление иллюминатора по контуру, мы определили максимальные значения напряжений. В действительности же при использовании стекол в рациональных конструкциях иллюминаторов отсутствует силовой контакт между стеклоэлементом и металлической оправой. Обычно окна устанавливаются в корпусе камеры с помощью резиновых или фторопластовых прокладок, что позволяет значительно снизить возникающие в них напряжения. Ясно, что при таком способе крепления иллюминатор под действием осевого перепада температур может деформироваться (прогнуться), однако экспериментальная оценка такой деформации показала, что ее значение не превышает деформацию иллюминатора при свободном его закреплении. Это послужило основанием для пренебрежения искажением волнового фронта в данной ситуации.

Деформация иллюминатора, обусловленная различием коэффициентов теплового расширения его материала и стальной оправы (иллюминатор холодный). При охлаждении иллюминатор и корпус криокамеры по-разному изменяют свои размеры, что связано с различием коэффициентов линейного расширения α их материалов. Так, для кварцевого стекла $\alpha_{\text{кв}} = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а нержавеющей стали — $\alpha_{\text{ст}} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Поэтому существует вероятность, что при охлаждении иллюминатор будет сжиматься корпусом. В этом разделе проанализируем возможность использования имеющегося иллюминатора ($R_{\text{св}} = 60$ мм и $h = 15$ мм) для работы в газонаполненной камере,

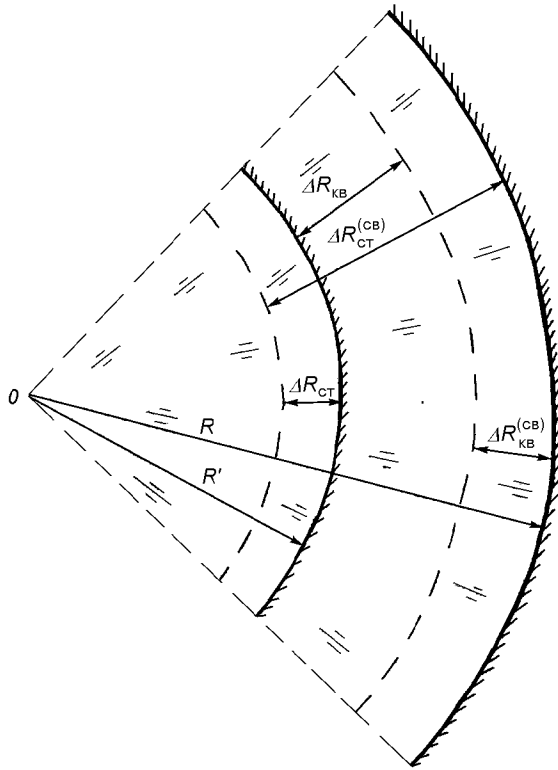


Рис. 4. Деформация иллюминатора, обусловленная различием коэффициентов теплового расширения его материала и стальной оправы

когда иллюминатор и его стальная оправка подвергаются напряжениям в результате охлаждения. Для оценки максимальных значений напряжений σ_r и σ_θ рассматривается случай предельно жесткого крепления края иллюминатора в корпусе камеры. Если бы иллюминатор и оправка находились в свободном состоянии, то при понижении температуры на ΔT , из-за различия коэффициентов теплового расширения они занимали бы разное положение (на рис. 4 показано пунктиром): радиус свободного кварцевого иллюминатора укоротился бы на величину

$$\Delta R_{KB}^{(CB)} = R\alpha_{KB}\Delta T, \quad (15)$$

где R — радиус иллюминатора и отверстия в корпусе; α_{KB} — коэффициент теплового расширения иллюминатора до охлаждения.

Положение свободного стального корпуса изменилось бы на величину

$$\Delta R_{CT}^{(CB)} = R\alpha_{CT}\Delta T, \quad (16)$$

где α_{CT} — коэффициент теплового расширения стального корпуса.

В действительности же из-за жесткой связи между собой граница между корпусом и иллюминатором

займет положение, характеризуемое радиусом-вектором R' . В результате возникнет относительное радиальное укорочение иллюминатора:

$$\varepsilon_{KB} = \Delta R_{KB} / R' \quad (17)$$

и относительное радиальное удлинение отверстия корпуса:

$$\varepsilon_{CT} = \Delta R_{CT} / R'. \quad (18)$$

В дальнейшем используем зависимость напряжений от деформаций при осесимметричном сжатии (Рудицин и др., 1970):

$$\sigma = E\varepsilon / (1 - \mu) \quad (19)$$

и предположение о том, что напряжения, возникающие на контурах иллюминатора и корпуса, одинаковы:

$$\varepsilon_{CT} E_{CT} / (1 - \mu_{CT}) = \varepsilon_{KB} E_{KB} / (1 - \mu_{KB}). \quad (20)$$

В этом случае из выражения (20) с учетом (17) и (18) получаем соотношение

$$\Delta R_{CT} E_{CT} / (1 - \mu_{CT}) = (\Delta R_{KB} E_{KB}) / (1 - \mu_{KB}). \quad (21)$$

Кроме того, из рис. 4 видно, что существует соотношение

$$\Delta R_{CT} + \Delta R_{KB} = \Delta R_{CT}^{(CB)} - \Delta R_{KB}^{(CB)} = R\Delta T(\alpha_{CT} - \alpha_{KB}), \quad (22)$$

которое вместе с (21) составляет систему уравнений для определения деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CT} = \{ & E_{KB}(1 - \mu_{CT}) / [E_{CT}(1 - \mu_{KB}) + \\ & + E_{KB}(1 - \mu_{CT})] \} (\alpha_{CT} - \alpha_{KB}) \Delta T, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{KB} = \{ & E_{CT}(1 - \mu_{KB}) / [E_{CT}(1 - \mu_{KB}) + \\ & + E_{KB}(1 - \mu_{CT})] \} (\alpha_{CT} - \alpha_{KB}) \Delta T. \end{aligned}$$

При этом сжимающие напряжения определяются выражением

$$\begin{aligned} \sigma = \{ & E_{CT} E_{KB} / [E_{CT}(1 - \mu_{KB}) + \\ & + E_{KB}(1 - \mu_{CT})] \} (\alpha_{CT} - \alpha_{KB}) \Delta T. \end{aligned} \quad (24)$$

Рассмотрев работу иллюминатора в режиме газонаполненной камеры (иллюминатор холодный) пришли к следующему выводу: под действием осевого перепада температур и из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения иллюминатора и его оправы в иллюминаторе возникают напряжения, вызванные его деформацией. В подобных ситуациях несимметричная деформация стеклоэлемента приводит к анизотропии материала — к двойному лучепреломлению. Однако правильное крепление стеклоэлемента с использованием резиновых (фторопластовых) прокладок позволило этого избежать, максимально приблизив деформацию иллюминатора к осесимметричной. В этом случае $\sigma_r = \sigma_\theta$, а следовательно, изменения показателей

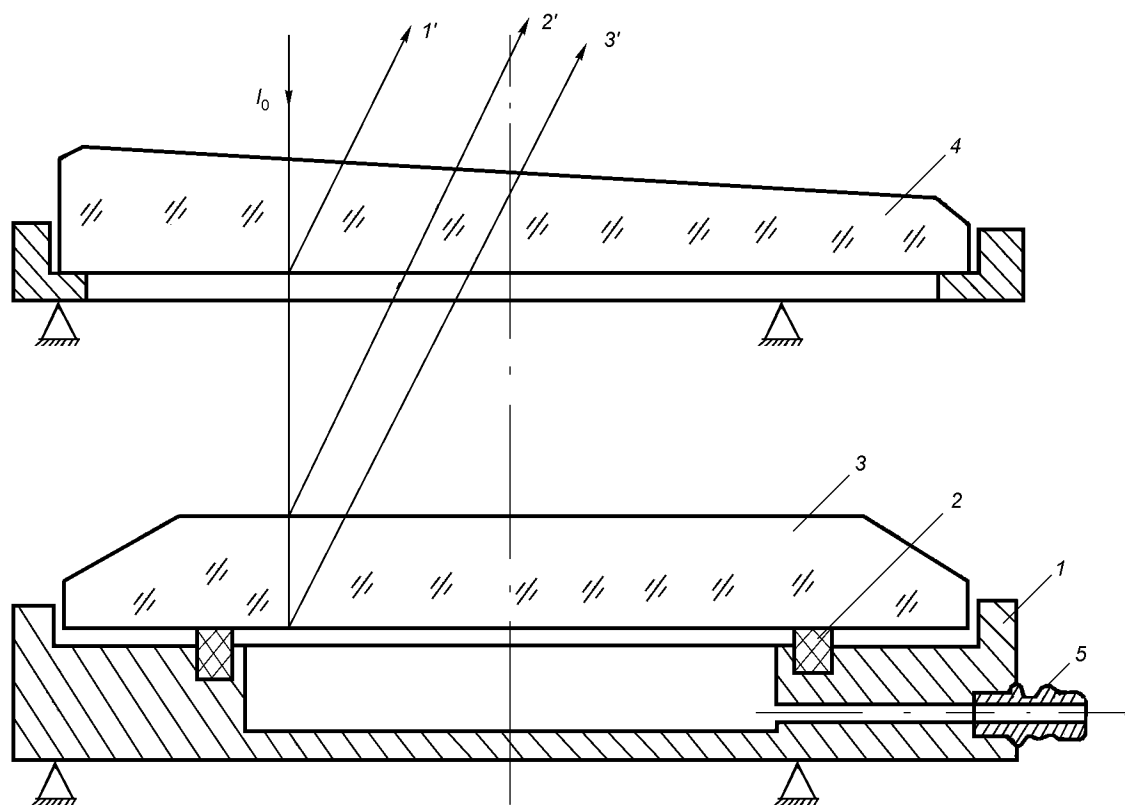


Рис. 5. Лабораторная приставка к интерферометру Физо для моделирования работы иллюминатора в вакуумной экспериментальной камере: 1 — корпус приставки; 2 — уплотнительное кольцо; 3 — иллюминатор; 4 — эталонная пластина интерферометра; 5 — штуцер

преломления в плоскости главных напряжений σ_r и σ_θ равны (Шрамко, 1972), т. е. оптическая анизотропия отсутствует. Для этой ситуации (осесимметричное сжатие) и даны выше оценки максимальных значений главных напряжений.

Оценка прочности пластины иллюминатора. С помощью выражения (24) оценили величину сжимающих напряжений и сравнили со значением предела прочности $\sigma_{пр}$ кварцевого стекла при сжатии (Мозберг, 1991): эта величина составила $\sigma = 135$ МПа, т. е. запас прочности иллюминатора оказался четырехкратным.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИЛЛЮМИНАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ

Выполнив теоретическое моделирование и оценки двух ситуаций, приводящих к деформации иллюминатора, мы изготовили иллюминатор и перед установкой его в экспериментальной вакуумной камере провели проверку достоверности результа-

тов расчета и правильности рассмотренных моделей для случая деформации иллюминатора под действием разности давлений.

Для осуществления такого эксперимента была изготовлена приставка к интерферометру Физо (рис. 5), представляющая собой плоскую цилиндрическую камеру 1, размещенную на юстируемых опорах предметного столика интерферометра. В канавку укладывалось уплотнительное кольцо 2, на которое устанавливался иллюминатор 3. Интерференционная картина образуется в результате взаимодействия лучей 1', 2', 3' отраженных от поверхностей иллюминатора и нижней поверхности эталонной пластины интерферометра 4. Для создания деформирующей разницы давлений ($\Delta P = 101.325$ кПа) объем под иллюминатором откачивался через штуцер 5. Такой способ герметизации иллюминатора близок к шарнирной модели. На рис. 6, а приведена интерферограмма для иллюминатора в ненапряженном состоянии. Видны две системы полос: равноотстоящие примерно линейные полосы равной толщины и одна кольцевая

полоса. Первая система полос обусловлена клиновидностью верхней и нижней поверхностей иллюминатора в направлении, перпендикулярном к линейным полосам и образуется при интерференции лучей 2' и 3'. Кольцевая полоса обусловлена приблизительно осесимметричной неплоскостью верхней поверхности иллюминатора и образуется при интерференции лучей 1', 2'. При определении направления отклонения поверхности иллюминатора от плоскости по стандартной методике оказалось, что поверхность имеет выпуклость в сторону эталонной пластины. После деформации иллюминатора в результате откачки внутреннего объема наблюдаемая картина изменяется (рис. 6, б).

Мы определяли величины деформаций иллюминатора, основываясь на факте, что расстояние между соседними кольцами соответствует изменению воздушного зазора между поверхностями эталонной пластины и иллюминатора на половину длины волны источника света (лазер, $\lambda = 0.63$ мкм). Если в поле зрения находится N concentric rings, то величина прогиба испытываемой поверхности:

$$w = N\lambda/2.$$

Вычитая из числа наблюдаемых в поле зрения колец N , кольца, обусловленные отклонением поверхности иллюминатора от плоскости, определили деформацию иллюминатора под влиянием давления: $w = (12 - 1)0.63/2 = 3.41$ мкм. Сравнение расчетных оценок ($w = 3.5$ мкм) и экспериментальных результатов показало хорошее согласие, что свидетельствует о правильном моделировании конкретной ситуации и пригодности изготовленного иллюминатора для работы в экспериментальной камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан методический подход, включающий предварительный анализ, моделирование факторов, приводящих к искажению волнового фронта иллюминатором криогенной экспериментальной камеры при интерферометрических исследованиях и предварительный лабораторный контроль готового иллюминатора. В результате сравнения оценочных расчетов и экспериментальных результатов влияния деформации входного иллюминатора под действием перепада давления на величину искажений, вносимых иллюминатором в интерференционное поле установки, получено достаточно хорошее соответствие расчета и эксперимента.

Получены оценки деформаций волнового фронта кварцевым иллюминатором диаметром 160 мм для

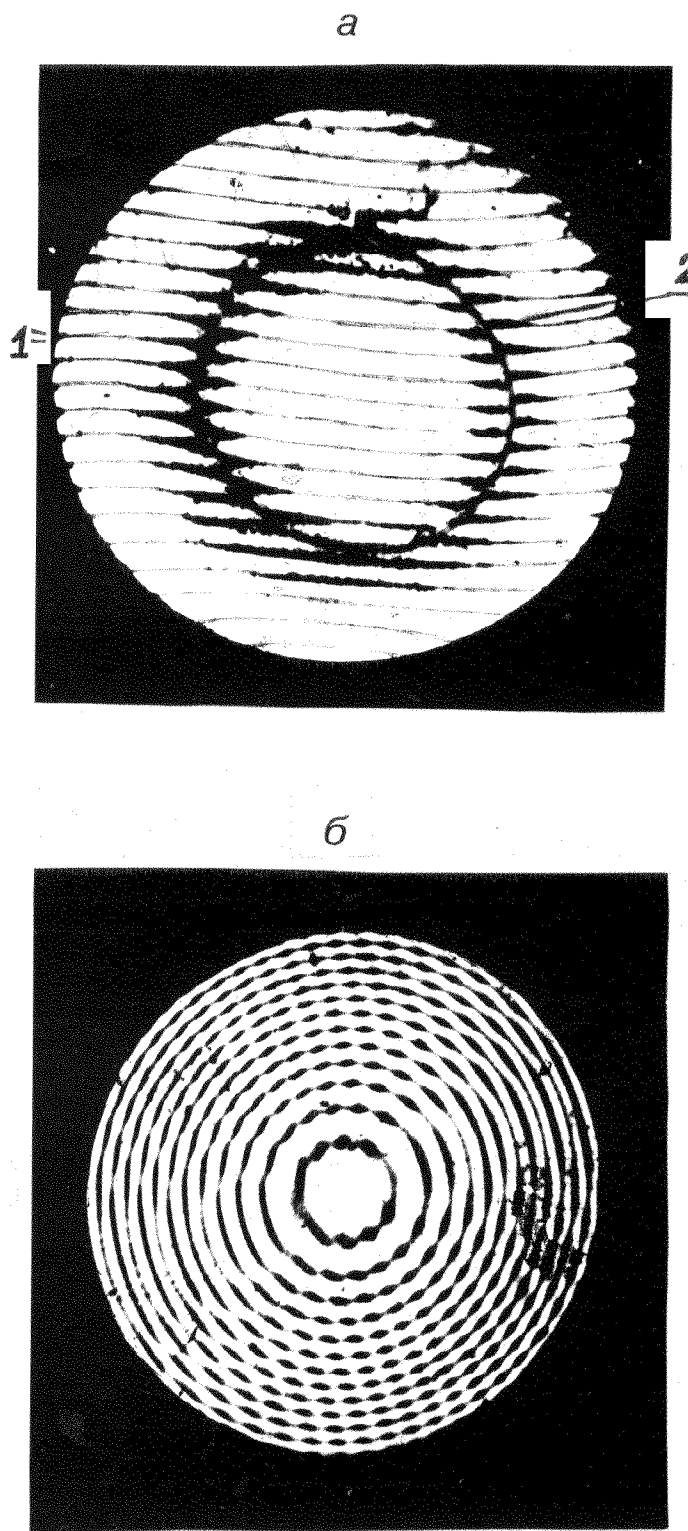


Рис. 6. Интерферограммы иллюминатора: а — в ненапряженном состоянии; б — после деформации при откачке внутреннего объема

разных его толщин вследствие вакуумирования внутреннего объема экспериментальной камеры. Сравнение полученных оценок с допустимыми искажениями волнового фронта позволило выбрать оптимальную толщину иллюминатора вакуумированной экспериментальной камеры $h = 15 \pm 5$ мм, обеспечивающую его незначительное влияние на волновой фронт.

Получены оценки напряжений в иллюминаторе, обусловленные возможным несоответствием коэффициентов теплового расширения иллюминатора и оправы при испытаниях в газонаполненной камере (иллюминатор холодный).

Величина напряжения, возникающего при рассмотренной установке иллюминатора в корпусе камеры сравнивалась со значением предела прочности кварцевого стекла при сжатии. В результате сравнения было определено, что данный иллюминатор имеет более чем четырехкратный запас прочности, что дает право считать его пригодным при испытаниях в заданных условиях.

Предложенный в работе методический подход может быть использован в случае, когда имеется готовый иллюминатор и необходимо оценить его пригодность к работе в конкретных условиях. Такая задача часто встречается в случае, когда в качестве иллюминатора используется эталонная пластина интерферометра.

- Амур Г. И. Параметры материала, определяющие точность поверхности крупных астрономических зеркал // Опτικο-мех. пром-сть.—1983.—№ 3.—С. 4—6.
- Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. — М.: Издательство МГУ, 1966.—210 с.
- Беляева А. И., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е. Проточные криостаты для лабораторных исследований. — Киев: Наук. думка, 1987.—232 с.
- Беляева А. И., Клушин Н. П., Коноводченко Е. В., Цыбульский В. В. Методы контроля качества оптических поверхностей. — Харьков, 1988.—36 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 21—88).
- Беляева А. И., Коноводченко Е. В. Низкофононовые спектральные приборы. — Харьков, 1989.—48 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 35—89).
- Беляева А. И., Сиренко В. А. Криогенные многослойные покрытия. — Киев: Наук. думка, 1991.—273 с.
- Беляева А. И., Камышова И. В., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е.

- Экспериментальный стенд для оптических зеркал, охлаждаемых жидким гелием // ПТЭ.—1993.—№ 6.—С. 186—189.
- Горянкин Г. С., Денисов Р. Н., Ермаков Б. А. и др. Криооптические системы // Оптический журн.—1994.—№ 1.—С. 71—74.
- Любарский С. В., Химич Ю. П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журн.—1994.—№ 1.—С. 76—83.
- Мозберг Р. К. Материаловедение. — М.: Высш. шк., 1991.—448 с.
- Нифонтова Е. Г., Шрамко Ю. П. Деформация фронта волны в круглой пластине с радиальным градиентом температуры // Опτικο-мех. пром-сть.—1986.—№ 8.—С. 16—18.
- Писаренко Г. С., Амелянович К. К., Козуб Ю. И. и др. Конструкционная прочность стекол и ситаллов. — Киев: Наук. думка, 1979.—284 с.
- Писаренко Г. С. Сопротивление материалов. — Киев: Вища шк., 1986.—776 с.
- Рудин М. Н., Артемов П. Я., Любошиц М. И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. — Минск: Вышешая шк., 1970.—630 с.
- Шрамко Ю. П. Влияние теплового режима иллюминатора на деформацию фронта волны // Опτικο-мех. пром-сть.—1972.—№ 3.—С. 14—17.
- Crowe D. A., Melugin R. R., Miller J. H. Ultra lightweight mirror performance at 8 degrees Kelvin // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 179—190.
- Miller J. H., Witteborn F. C., Garland H. J. Cryogenic testing of mirrors for infrared space telescopes // Proc. SPIE.—1982.—332.—P. 413—418.
- Morrow H. E., Hamamoto A. S., Ferguson G. K., Jeffrey P. L. Interferometry at cryogenics temperatures // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 152—170.
- Petrie W. IRAS telescope cryotest chamber // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 110—118.

ANALYSIS OF PHYSICAL MODELS FOR THE EFFECT OF THE CRYOGENIC CAMERA WINDOW ON WAVE FRONT DEFORMATION

A. I. Beliaeva and I. V. Kamysheva

Influence of the window of cryogenic interference set up (CIS) on the light wave front was studied. Main factors which govern wave front distortion by the window were simulated. A method was developed for preliminary theoretical model analysis of these factors. Original method of laboratory control of the window before its installation into the CIS is suggested. The choice of the main distorting factors was determined by two characteristic regimes of CIS operation (vacuum and gas-filled). Comparison of theoretical calculations with experimental data suggests that the models proposed are adequate.

УДК 629.07.54

Механизм прохождение акустической волны через плоскопараллельные элементы конструкции носителей

В. В. Карачун

Національний технічний університет України «Київський політехнічний Інститут», Київ

Надійшла до редакції 06.03.97

З'ясовуються особливості впливу звукового випромінювання двигунів носіїв на плоскі елементи конструкції.

Акустическое излучение двигателей ракет-носителей, как оказалось, существенно влияет на динамику элементов конструкции, особенно во время старта. Генерируемые звуковой волной изгибные колебания приводят к возникновению особенностей, которые могут стать определяющими не только с позиции ухудшения эксплуатационных свойств конструкции, но и стать решающими с точки зрения ее надежности в целом. Речь идет о возникновении резонансных явлений — волнового совпадения и частотного резонанса.

Воздействие звукового излучения на плоские элементы конструкции рассмотрим на механической модели в виде двух акустически однородных пластин, поверхности которых параллельны между собой, а промежуток между ними дискретно-непрерывно заполнен упругой средой. Для простоты пренебрежем продольными связями (связями сдвига) и ограничимся рассмотрением только поперечных связей, считая, что они соединяют пластины и препятствуют изменению расстояния между ними, подчиняясь закону Гука (Дидковский и др., 1991).

Схема прохождения плоской волны звукового давления в этом случае представлена на рис. 1. Здесь θ — угол падения волны, h_1 — толщина

пластины, 2δ — толщина упругой прослойки. Объем, занимаемый упругими связями, предполагается намного меньшим объема воздушного промежутка между пластинами.

Предполагая, что напряженное и деформированное состояние пластин постоянной жесткости описывается уравнением изгиба тонкой упругой изо-

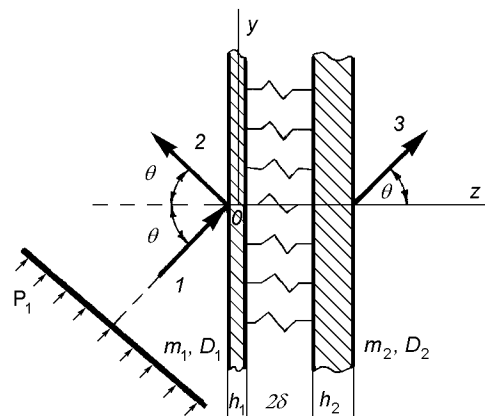


Рис. 1. Схема прохождения плоской волны звукового давления

тропной пластины, колебательное движение плоскопараллельной преграды запишем в виде

$$\begin{aligned} \nabla^4 \frac{\partial^4 W_1}{\partial t^4} + [(D_1 m_1^{-1} + D_2 m_2^{-1}) \nabla^8 + k(m_1^{-1} + \\ + m_2^{-1}) \nabla^4] \frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + k(m_1 m_2)^{-1} (D_1 + D_2) \nabla^8 W_1 + \\ + D_1 D_2 (m_1 m_2)^{-1} \nabla^{12} W_1 = (m_1 m_2)^{-1} (D_2 \nabla^8 q_1 + \\ + m_2 \nabla^4 \frac{\partial^2 q_1}{\partial t^2} + k \nabla^4 q_1 + k \nabla^4 q_2), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla^4 \frac{\partial^4 W_2}{\partial t^4} + [(D_1 m_1^{-1} + D_2 m_2^{-1}) \nabla^8 + k(m_1^{-1} + \\ + m_2^{-1}) \nabla^4] \frac{\partial^2 W_2}{\partial t^2} + k(m_1 m_2)^{-1} (D_1 + D_2) \nabla^8 W_2 + \\ + D_1 D_2 (m_1 m_2)^{-1} \nabla^{12} W_2 = (m_1 m_2)^{-1} (D_1 \nabla^8 q_2 + \\ + m_2 \nabla^4 \frac{\partial^2 q_2}{\partial t^2} + k \nabla^4 q_2 + k \nabla^4 q_1), \end{aligned}$$

где m_i , D_i — соответственно массы и цилиндрические жесткости пластин; W_i — перемещение точек поверхности пластин в направлении оси z ; k — приведенный коэффициент упругого основания при сжатии-растяжении;

$$q_1 = (P_1 + P_2) \Big|_{z = -\frac{h_1}{2}}, \quad q_2 = (-P_3) \Big|_{z = \frac{h_1}{2} + 2\delta + h_2}$$

— внешние нагрузки на пластины.

Считаем, что колебательное движение передается от первой пластины ко второй только через упругие связи.

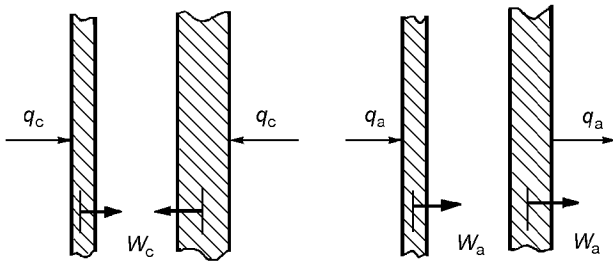


Рис. 2. Симметричная и антисимметричная составляющие звукового давления, действующего на плоскопараллельную конструкцию

Звуковое давление представим в виде двух составляющих — симметричной и антисимметричной (рис. 2), а давление в падающей, отраженной и

прошедшей волнах — в виде

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{10} \exp i \left[\omega t - k_0 y \sin \theta - k_0 \left(z + \frac{h_1}{2} \right) \cos \theta \right], \\ P_2 &= P_{20} \exp i \left[\omega t - k_0 y \sin \theta + k_0 \left(z + \frac{h_1}{2} \right) \cos \theta \right], \\ P_3 &= \\ &= P_{30} \exp i \left[\omega t - k_0 y \sin \theta - k_0 \left(z - \frac{h_1}{2} - 2\delta - h_2 \right) \cos \theta \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Чтобы учесть влияние внутреннего трения в материале пластин, приводящее к необходимому рассеянию энергии звукового излучения, представим цилиндрическую жесткость пластин в комплексной форме, т. е. будем полагать, что $D_1 = D_1(1 + i\eta_1)$, $D_2 = D_2(1 + i\eta_2)$. Для упрощения вычислений коэффициенты потерь для обеих пластин примем одинаковыми: $\eta_1 = \eta_2 = \eta$. С учетом принятых допущений решения уравнений (1) имеют вид

$$W_1 = (S_1 S_2 - k^2)^{-1} [(P_1 + P_2) \dot{S}_2 - k P_3], \quad (3)$$

$$W_2 = (S_1 S_2 - k^2)^{-1} [(P_1 + P_2) k - S_1 P_3],$$

где

$$S_1 = \lambda_1^{-1} m_2 \omega^2 (\lambda_1 \beta \psi_2 - 1) + i \eta m_2 \omega^2 \psi_2 + k;$$

$$S_2 = \omega^2 m_2 (\psi_2 - 1) + i \eta m_2 \omega^2 \psi_2 + k;$$

$$\psi_2 = (C_{и2} c^{-1} \sin \theta)^4; \quad \beta = D_1 D_2^{-1}; \quad \lambda_1 = m_2 m_1^{-1};$$

$C_{и2} = (m_2^{-1} D_2 \omega^2)^{\frac{1}{4}}$ — фазовая скорость изгибной волны во второй пластине.

Граничные условия для наружных поверхностей пластин могут быть представлены соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_1}{\partial t} &= [(P_1 - P_2) z_0^{-1} \cos \theta]_{z = -\frac{h_1}{2}}, \\ \frac{\partial W_2}{\partial t} &= [P_3 z_0^{-1} \cos \theta]_{z = \frac{h_1}{2} + 2\delta + h_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда из (4) с учетом (3) можно определить значения коэффициентов A и B прохождения и отражения звука:

$$A = P_{30} P_{10}^{-1} = 2k\gamma [1 + \gamma(S_1 + S_2) + \gamma^2 S_1 S_2 - \gamma^2 k^2]^{-1}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B = P_{20} P_{10}^{-1} &= [-1 + \gamma(S_1 + S_2) + \gamma^2 S_1 S_2 - \gamma^2 k^2] \times \\ &\times [1 + \gamma(S_1 + S_2) + \gamma^2 S_1 S_2 - \gamma^2 k^2]^{-1}, \end{aligned}$$

где $\gamma = (i\omega z_0)^{-1} \cos \theta$.

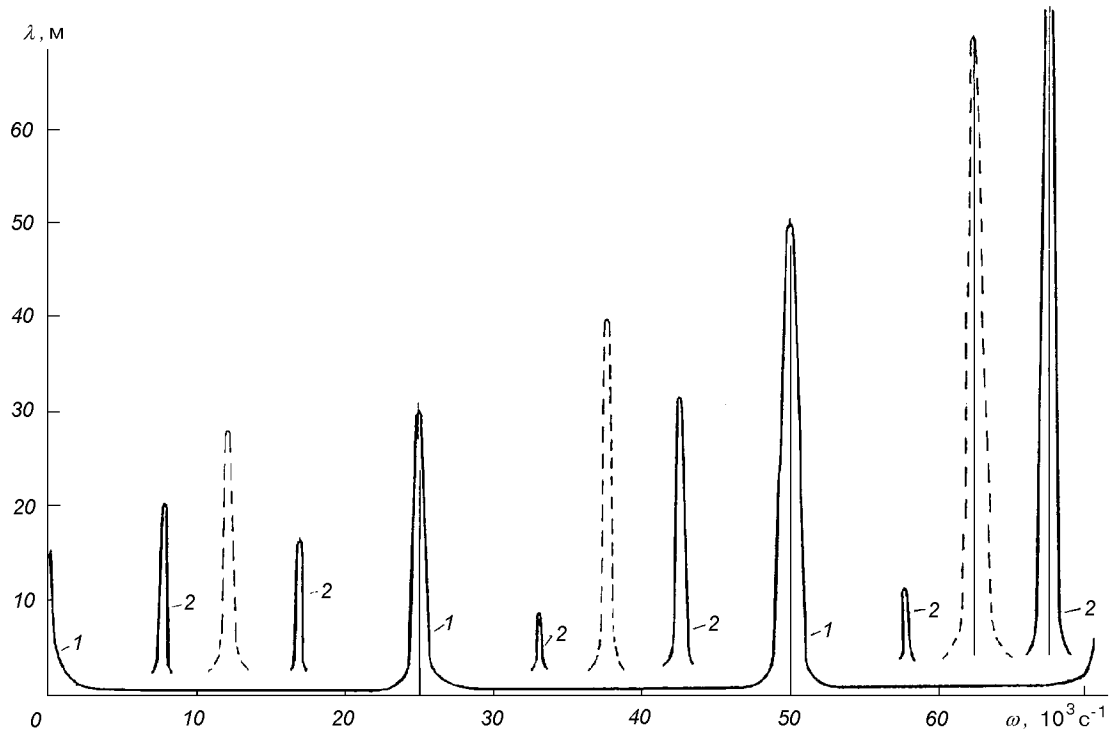


Рис. 3. Зависимость длины λ изгибной волны от частоты ω волны акустического давления

При $k(\omega^2 m_1)^{-1} \ll 1$ и $k(\omega^2 m_2)^{-1} \ll 1$, что практически всегда имеет место начиная со средних частот,

$$A \approx 2k(\gamma S_1 S_2)^{-1};$$

$$B \approx 1 - 2(\gamma^2 S_1 S_2)^{-1}.$$

Из формул (3) с учетом соотношений (5) можно в окончательном виде записать закон изгибных колебаний второй пластины под действием прошедшего акустического излучения:

$$W_2 = P_{10} k (S_1 S_2 - k^2)^{-1} \left\{ 1 + B \exp i \left[2k_0 \left(z + \frac{h_1}{2} \right) \cos \theta \right] + k^{-1} S_1 A \exp i [k_0 (h_1 + h_2 + 2\delta) \cos \theta] \right\} \times \exp i \left[\omega t - k_0 y \sin \theta - k_0 \left(z + \frac{h_1}{2} \right) \cos \theta \right]. \quad (6)$$

Численный анализ изгибного движения второй пластины для значений параметров $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $D_1 = D_2 = 1$ Н·м; $h_1 = h_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $m_2 m_1^{-1} = 0.8$; $\theta = 0.98$ рад показывает, что график функции изменения длины λ изгибной волны от частоты ω волны акустического давления представляет собой симметричную относительно оси ординат кривую с характерными четырьмя «пиками», в промежутках

между которыми длина волны убывает к середине участка, достигая 0.1 м (рис. 3, кривая 1).

На частотах ω_c , равных $8.2 \cdot 10^3$ с⁻¹, $16.4 \cdot 10^3$ с⁻¹, $33.2 \cdot 10^3$ с⁻¹, $41.6 \cdot 10^3$ с⁻¹, $58.2 \cdot 10^3$ с⁻¹ и $66.6 \cdot 10^3$ с⁻¹ в спектре наблюдается суперпозиция двух форм колебаний различной протяженности и амплитуды (рис. 3, кривые 2).

Пунктирной линией изображены длины модулирующих волн (биения) при прохождении резонансных областей ω_δ , равных $12.4 \cdot 10^3$ с⁻¹, $37.6 \cdot 10^3$ с⁻¹, $62.4 \cdot 10^3$ с⁻¹. С увеличением угла θ характер кривой 1 не изменяется, она лишь сжимается по оси частот. На частотах ω_ϕ фаза колебаний изменяется на π рад.

На рис. 4 для примера приведен график изменения амплитуды изгибной волны второй пластины при угле $\theta = 1.374$ рад (78.75°) как наиболее характерный — имеющий и всплеск кривой, и точку изгиба с последующим возрастанием.

Массораспределение в плоскопараллельной пластине оказывает существенное влияние на акустодинамические свойства преграды. Длина волны сохраняет ту же зависимость, а амплитуда — только при $0.2 \leq m_2 m_1^{-1} \leq 0.8$. Дальнейшее уменьшение массы второй пластины приводит к изменению

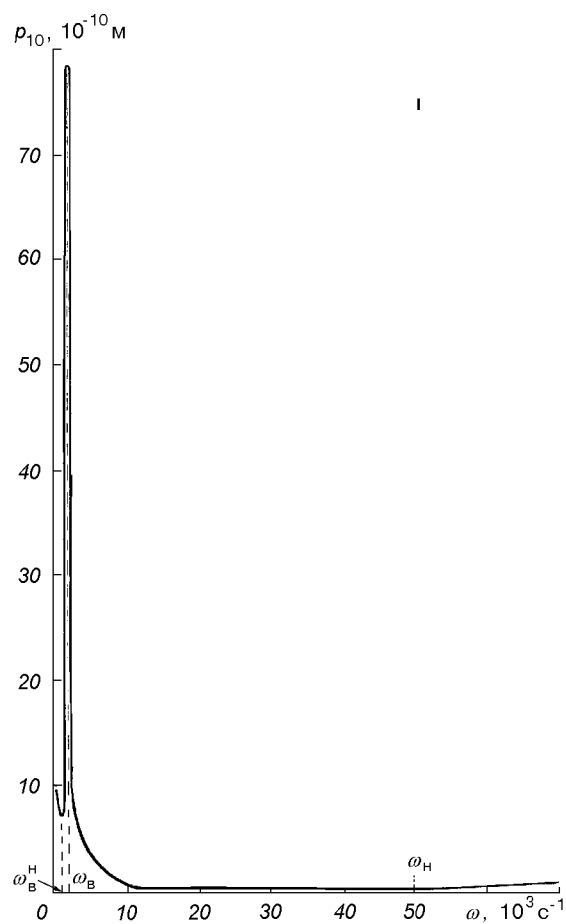


Рис. 4. Значение амплитуды изгибной волны плоскопараллельной пластины при $\theta = 1.374$ рад (78.75°)

экспоненциального характера графика: начиная с частоты ω_H амплитуда увеличивается до a_n и затем остается практически постоянной до частоты ω_{B2} , где наблюдается второй всплеск (рис. 5). Дальнейшее уменьшение соотношения масс $m_2 m_1^{-1}$ приводит к смещению вправо по оси частот второго всплеска и одновременному увеличению абсолютных значений прогибов пластин. Таким образом, при прочих равных условиях более легкие пластины обладают повышенной способностью к самовозбуждению, что является подтверждением закона массы.

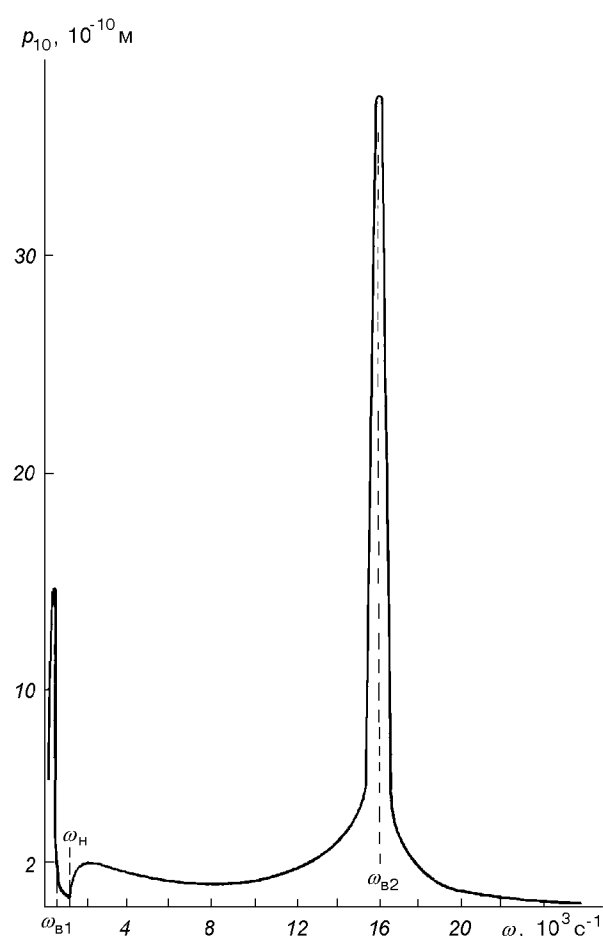


Рис. 5. Изменение амплитуды изгибных колебаний при $m_2 m_1^{-1} = 0.02$

Дидковский В. С., Карачун В. В., Заборов В. И. Проектирование ограждающих конструкций с оптимальными звуко- и виброизоляционными свойствами. — К.: Будівельник, 1991.—120 с.

MECHANISM OF THE PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES THROUGH PARALLEL-PLATE ELEMENTS OF CARRIER VEHICLE STRUCTURES

V. V. Karachun

We investigate the effect of acoustic radiation from carrier vehicle engines of plate elements of carrier structure.

УДК 517.977

Динамика пространственных движений космического упругого робота-манипулятора

В. И. Гуляев¹, Т. В. Завражина²

¹ Український транспортний університет, Київ

² Київський державний технічний університет будівництва та архітектури

Надійшла до редакції 02.04.96

Поставлено задачу про пружні коливання космічного робота-манипулятора з розподіленими параметрами. Побудована система диференціальних рівнянь гібридного типу, запропонована методика її розв'язування, основана на застосуванні чисельного методу Хуболта та матриці фундаментальних розв'язків. Розглянуто приклад.

Отличительная особенность динамики управляемого движения космических роботов-манипуляторов связана с видом нагрузок, действующих на элементы их конструкций и на переносимые ими тела. При относительно малых размерах звеньев манипулятора можно пренебречь действующими на них силами гравитации и принимать во внимание только нагрузки сил инерции, вызванные их относительными движениями. В случае, когда протяженность звеньев манипулятора велика или манипулятор действует на удалении от общего центра масс, совершающего орбитальное движение космического комплекса, необходимо также учитывать и силы градиента гравитационного поля. Поскольку рассмотренные виды сил для реальных орбитальных систем являются сравнительно малыми, изгибные жесткости звеньев манипулятора можно выбирать относительно небольшими. В этом случае при исследовании динамики программного управляемого движения манипулятора необходимо учитывать упругую податливость его звеньев, позволяющую повысить точность его позиционирования и улучшить его динамические характеристики.

В работах Акуленко (1983), Wen-Jieh Wang et al. (1989), Yossi Chait et al. (1990), Chapnik et al.

(1991) рассмотрены задачи по исследованию однозвенных упругих манипуляторов путем приведения их механических моделей к системам с конечным числом степеней свободы путем разложения искомым функций упругих перемещений в конечный ряд по собственным формам или другим системам функций. Конечномерные модели многозвенных упругих роботов изучаются в работах Акуленко (1981), Черноусько и др. (1989), Kirc et al. (1995). Они базируются на специальных предположениях об инерционных и жесткостных характеристиках их звеньев и формах их упругого деформирования.

В данной работе предложена математическая модель динамики упругих многозвенных управляемых манипуляторов как систем с распределенными параметрами, испытывающих действие управляющих моментов и сил инерции относительных колебаний, построена относящаяся к гибриднему типу система нелинейных дифференциальных уравнений с обыкновенными и частными производными относительно искомым переменных, разработан шаговый алгоритм построения решений этих уравнений, позволяющий на каждом шаге вычислительной процедуры разделить нелинейную часть задачи определения углов относительных поворо-

тов в шарнирах смежных звеньев и линейную многоточечную краевую задачу определения относительных упругих перемещений звеньев всей стержневой цепи.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Поставим задачу о динамике пространственного управляемого движения многосвязного манипулятора, состоящего из N прямолинейных упругих стержней длиной l_k ($k = 1, \dots, N$), соединенных между собой идеальными цилиндрическими шарнирами. Пронумеруем звенья в порядке их присоединения друг к другу, считая что первое звено шарнирно соединено с неподвижным основанием. Введем орбитальную систему координат $OXYZ$ и свяжем с каждым n -м звеном местную систему координат $O_n x_n y_n z_n$ с ортами $\mathbf{i}_n, \mathbf{j}_n, \mathbf{k}_n$ так, чтобы точка O_n совпадала с началом n -го стержня, ось $O_n x_n$ совпадала с его осевой линией, а соответствующие оси $O_k y_k$ и $O_k z_k$ ($k = 1, \dots, N$) всех звеньев были параллельны, когда вся кинематическая цепочка манипулятора вытянута в одну прямую линию и оси $O_k x_k$ ($k = 1, \dots, N$) направлены вдоль одной прямой. Примем, что каждая из осей соединяющих звенья цилиндрических шарниров совпадает с одной из осей местной системы координат. Угол поворота последующего n -го звена по отношению к предыдущему вокруг одной из осей $O_n x_n, O_n y_n$ или $O_n z_n$ обозначим φ_n, ψ_n или θ_n соответственно. Он считается положительным, если с конца соответствующей оси вращения поворот виден происходящим против хода часовой стрелки. В шарнирах к звеньям приложены управляющие моменты M_k^e , которые считаются положительными, если они стремятся повернуть звенья в положительных направлениях.

Выделим условно n -е звено манипулятора и, пользуясь принципом Даламбера и опуская в соответствующих местах индекс « n », выпишем уравнения его динамического равновесия (Гуляев, 1992)

$$\begin{aligned} EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho F a_x + q_x &= 0, \\ EJ_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left[N(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \rho F a_y - q_y &= 0, \\ EJ_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left[N(x) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \rho F a_z - q_z &= 0, \\ GJ_p \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u, v, w — функции упругих перемещений стержня вдоль осей Ox, Oy, Oz соответственно; γ — угол закручивания; EF, EJ_z, EJ_y, GJ_p — жесткости при растяжении, изгибе и кручении; $N(x)$ — внутренняя продольная сила; ρ — плотность материала; F — площадь поперечного сечения; a_x, a_y, a_z — компоненты вектора абсолютного ускорения элемента стержня; q_x, q_y, q_z — компоненты вектора $\mathbf{q}(x)$ интенсивности сил градиента гравитационного поля:

$$\begin{aligned} q_x &= -q \cos(Z, x), \\ q_y &= -q \cos(Z, y), \\ q_z &= -q \cos(Z, z), \end{aligned} \quad (2)$$

Будем считать, что каждый элемент стержня находится в состоянии сложного движения, тогда его абсолютное ускорение $\mathbf{a}(x)$ можно представить в виде

$$\mathbf{a}(x) = \mathbf{a}^e(x) + \mathbf{a}^c(x) + \mathbf{a}^r(x), \quad (3)$$

где $\mathbf{a}^e(x), \mathbf{a}^c(x), \mathbf{a}^r(x)$ — соответственно векторы переносного, кориолисового и относительного ускорений.

Ускорение $\mathbf{a}^e(x)$ вычисляется по формуле

$$\mathbf{a}^e(x) = \mathbf{a}(0) + \varepsilon \times x \mathbf{i} + \omega \times (\omega \times x \mathbf{i}), \quad (4)$$

где $\mathbf{a}(0)$ — абсолютное ускорение точки O_n ; ω, ε — соответственно векторы угловой скорости и углового ускорения подвижной системы координат $O_n x_n y_n z_n$ относительно системы $OXYZ$.

При реальных значениях угловой скорости ω и малых упругих смещениях u, v, w ускорением $\mathbf{a}^c(x)$ можно пренебречь.

В выражении для относительного ускорения

$$\mathbf{a}^r(x) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \mathbf{k} \quad (5)$$

первое слагаемое связано с продольными колебаниями стержней, которые оказываются более высокочастотными по сравнению с поперечными и происходят с малыми амплитудами. Поэтому для рассматриваемых динамических явлений процесс распространения продольных возмущений в стержне можно считать мгновенным, ускорением $\partial^2 u / \partial t^2$ пренебречь и продольную силу $N(x)$ подсчитывать из первого уравнения системы (1), которое при принятых предположениях принимает квазистатическую форму. Такими же соображениями определяется и вид четвертого уравнения системы (1), в котором не учитываются силы инерции крутильных колебаний элементов стержня.

С учетом (2)—(5) приведем систему (1) к виду

$$\begin{aligned}
EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \rho F [a_x(0) - (\omega_y^2 + \omega_z^2)x] + q \cos(Z, x), \\
EJ_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left[N(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right] &= \\
= -\rho F \left[a_y(0) + \varepsilon_z x + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right] - q \cos(Z, y), & \quad (6) \\
EJ_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left[N(x) \frac{\partial w}{\partial x} \right] &= \\
= -\rho F \left[a_z(0) - \varepsilon_y x + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right] - q \cos(Z, z), \\
GJ_p \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} &= 0.
\end{aligned}$$

Уравнения (6) кроме неизвестных полевых переменных $u(x, t)$, $v(x, t)$, $w(x, t)$, $\gamma(x, t)$ содержат также неизвестные функции времени $a_x(0)$, $a_y(0)$, $a_z(0)$, ε_y , ε_z , характеризующие ускорение начала подвижной системы координат $O_n x_n y_n z_n$ и ее угловое ускорение. Это обстоятельство должно быть учтено при постановке граничных условий.

Не снижая общности постановки задачи, принимаем для определенности, что $n-1$ -й и n -й стержни соединены цилиндрическим шарниром, ось которого совпадает с осью $O_n y_n$.

Поскольку система $O_n x_n y_n z_n$ жестко связана с началом n -го стержня, при $x_n = 0$ имеем

$$\begin{aligned}
u_n(0) = v_n(0) = w_n(0) &= 0, \\
v'_n(0) = w'_n(0) = 0, \quad \gamma'_n(0) &= 0.
\end{aligned} \quad (7)$$

Здесь рассматриваемые переменные помечены индексом « n », штрихом обозначено дифференцирование по x_n .

Из условий шарнирного соединения конца $n-1$ -го стержня с началом n -го стержня следуют:

$$\mathbf{R}_{n-1}(l_{n-1}) = -\mathbf{R}_n(0), \quad (8)$$

— условие равенства векторов моментов

$$\mathbf{M}_{n-1}(l_{n-1}) = -\mathbf{M}_n(0), \quad (9)$$

— условие равенства векторов абсолютных ускорений

$$\mathbf{a}_{n-1}(l_{n-1}) = \mathbf{a}_n(0), \quad (10)$$

— условие, вытекающее из соотношения между угловыми ускорениями систем $O_{n-1} x_{n-1} y_{n-1} z_{n-1}$ и $O_n x_n y_n z_n$, которое для описанного способа соединения стержней может быть записано в виде

$$\begin{aligned}
\varepsilon_n &= \mathbf{D}[\varepsilon_{n-1}, \dot{\gamma}_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{i}_{n-1}, \dot{w}'_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{j}_{n-1}, \\
&\quad \dot{v}'_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{k}_{n-1}, \ddot{\psi}_n \mathbf{j}_n].
\end{aligned} \quad (11)$$

Явная форма линейного оператора $\mathbf{D}$ может быть получена путем дифференцирования по времени t равенства, вытекающего из теоремы о сложении угловых скоростей при сложном движении:

$$\omega_n(0) = \omega_{n-1}(l_{n-1}) + \dot{\psi}_n \mathbf{j}_n,$$

с учетом соотношения

$$\begin{aligned}
\omega_{n-1}(l_{n-1}) &= \omega_{n-1} + \dot{\gamma}_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{i}_{n-1} - \\
&\quad - \dot{w}'_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{j}_{n-1} + \dot{v}'_{n-1}(l_{n-1})\mathbf{k}_{n-1}.
\end{aligned}$$

Здесь $\omega_n(0) = \omega_n$ — вектор угловой скорости базиса $\mathbf{i}_n, \mathbf{j}_n, \mathbf{k}_n$; $\omega_{n-1}(l_{n-1})$ — вектор угловой скорости трехгранника, жестко связанного с концом $x_{n-1} = l_{n-1}$ $n-1$ -го упругого стержня; точками обозначено дифференцирование по времени.

Для представления равенства (8) в скалярном виде спроецируем обе его части на оси системы $O_n x_n y_n z_n$:

$$\left\| \begin{array}{c} -N_{x,n}(0) \\ Q_{y,n}(0) \\ Q_{z,n}(0) \end{array} \right\| - \mathbf{B}_{n-1,n}^T \left\| \begin{array}{c} -N_{x,n-1}(l_{n-1}) \\ Q_{y,n-1}(l_{n-1}) \\ Q_{z,n-1}(l_{n-1}) \end{array} \right\| = 0.$$

Здесь $\mathbf{B}_{n-1,n} = \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_{n-1}$ — матрица перехода от базиса $\mathbf{i}_{n-1}, \mathbf{j}_{n-1}, \mathbf{k}_{n-1}$ к базису $\mathbf{i}_n, \mathbf{j}_n, \mathbf{k}_n$; $\mathbf{A}_n$ — матрица направляющих косинусов.

Аналогично преобразуются к скалярной форме равенства (9)—(11).

Таким образом, система (6) для n -го стержня замыкается граничными уравнениями (7)—(11).

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Пусть известны начальная конфигурация рассматриваемой системы

$$\begin{aligned}
\varphi_n(0) = \varphi_{n,0}, \quad \psi_n(0) = \psi_{n,0}, \quad \theta_n(0) = \theta_{n,0}, \\
u_n(x, 0) = u_{n,0}(x), \quad v_n(x, 0) = v_{n,0}(x), \\
w_n(x, 0) = w_{n,0}(x), \quad \gamma_n(x, 0) = \gamma_{n,0}(x),
\end{aligned}$$

начальные значения скоростей

$$\begin{aligned}
\dot{\varphi}_n(0) = \dot{\varphi}_{n,0}, \quad \dot{\psi}_n(0) = \dot{\psi}_{n,0}, \quad \dot{\theta}_n(0) = \dot{\theta}_{n,0}, \\
\dot{u}_n(x, 0) = \dot{u}_{n,0}(x), \quad \dot{v}_n(x, 0) = \dot{v}_{n,0}(x), \\
\dot{w}_n(x, 0) = \dot{w}_{n,0}(x), \quad \dot{\gamma}_n(x, 0) = \dot{\gamma}_{n,0}(x)
\end{aligned}$$

и заданы управляющие моменты

$$M_n^e = M_n^e(t) \quad (n = 1, \dots, N).$$

Для интегрирования по времени системы (6) воспользуемся неявной разностной схемой метода

Хуболта, в соответствии с которой производные некоторой функции X по времени dX/dt , d^2X/dt^2 в момент $t + \Delta t$ заменяются их конечноразностными аналогами

$$\begin{aligned}\dot{X}(t + \Delta t) &= \dot{X}_{t+1} = \\ &= (11X_{t+1} - 18X_t + 9X_{t-1} - 2X_{t-2})/(6\Delta t), \\ \ddot{X}(t + \Delta t) &= \ddot{X}_{t+1} = \\ &= (2X_{t+1} - 5X_t + 4X_{t-1} - X_{t-2})/(\Delta t)^2,\end{aligned}\quad (12)$$

где Δt — шаг интегрирования по времени, $X_{t+1} = X(t + \Delta t)$, $X_t = X(t)$, $X_{t-1} = X(t - \Delta t)$, $X_{t-2} = X(t - 2\Delta t)$.

С учетом (12) в момент времени $t + \Delta t$ заменим систему уравнений с частными производными (6) для n -го звена системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}EF \frac{d^2u}{dx^2} \Big|_{t+1} &= \rho F a_x(0) \Big|_{t+1} + \rho F [-(\omega_y^2 + \omega_z^2)x] \Big|_{t+1} + \\ &+ q \cos(Z, x) \Big|_{t+1}, \\ EJ_z \frac{d^4v}{dx^4} \Big|_{t+1} - N_t \frac{d^2v}{dx^2} \Big|_{t+1} - \frac{dN}{dx} \Big|_t \frac{dv}{dx} \Big|_{t+1} + \\ &+ \frac{2\rho F}{\Delta t^2} v_{t+1} = -\rho F a_y(0) \Big|_{t+1} - \rho F x \varepsilon_z \Big|_{t+1} - \\ &- \rho F \left[-\frac{5v_t}{\Delta t^2} + \frac{4v_{t-1}}{\Delta t^2} - \frac{v_{t-2}}{\Delta t^2} \right] - q \cos(Z, y) \Big|_{t+1}, \\ EJ_y \frac{d^4w}{dx^4} \Big|_{t+1} - N_t \frac{d^2w}{dx^2} \Big|_{t+1} - \frac{dN}{dx} \Big|_t \frac{dw}{dx} \Big|_{t+1} + \\ &+ \frac{2\rho F}{\Delta t^2} w_{t+1} = -\rho F a_z(0) \Big|_{t+1} + \rho F x \varepsilon_y \Big|_{t+1} - \\ &- \rho F \left[-\frac{5w_t}{\Delta t^2} + \frac{4w_{t-1}}{\Delta t^2} - \frac{w_{t-2}}{\Delta t^2} \right] - q \cos(Z, z) \Big|_{t+1}, \\ GJ_p \frac{d^2\gamma}{dx^2} \Big|_{t+1} &= 0.\end{aligned}\quad (13)$$

Особенность этой системы заключается в том, что составляющие ее уравнения не связаны между собой явно и зависимость друг от друга входящих в них переменных осуществляется только через граничные условия.

Будем считать, что состояние манипулятора в моменты времени t , $t - \Delta t$, $t - 2\Delta t$ известно, тогда в системе (13) неизвестными оказываются функции $u(x)$, $v(x)$, $w(x)$, $\gamma(x)$ и значения переменных $a_x(0)$, $a_y(0)$, $a_z(0)$, ε_y , ε_z в момент $t + \Delta t$. Для их определения воспользуемся методом начальных па-

раметров. Введем обозначения для недостающих начальных значений производных от искомых функций и неизвестных параметров в правых частях уравнений системы (13)

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{du(0)}{dx}, \quad C_2 = a_x(0), \quad C_3 = \frac{d^2v(0)}{dx^2}, \\ C_4 &= \frac{d^3v(0)}{dx^3}, \quad C_5 = a_y(0), \quad C_6 = \varepsilon_z, \quad C_7 = \ddot{\psi}_n, \\ C_8 &= \frac{d^3w(0)}{dx^3}, \quad C_9 = a_z(0), \quad C_{10} = \varepsilon_y, \quad C_{11} = \frac{d\gamma(0)}{dx}.\end{aligned}\quad (14)$$

Здесь и далее опущены нижние индексы $t+1$ у искомых переменных.

Представим решение системы (13) в виде

$$\begin{aligned}u(x) &= u^1(x)C_1 + u^2(x)C_2 + u^q(x), \\ v(x) &= v^3(x)C_3 + v^4(x)C_4 + v^5(x)C_5 + \\ &+ v^6(x)C_6 + v^q(x), \\ w(x) &= w^7(x)C_7 + w^8(x)C_8 + w^9(x)C_9 + \\ &+ w^{10}(x)C_{10} + w^q(x), \\ \gamma(x) &= \gamma^{11}(x)C_{11},\end{aligned}\quad (15)$$

где $u^q(x)$, $v^q(x)$, $w^q(x)$ — решения задач Коши для уравнений (13) при однородных начальных условиях и $a_x(0) = a_y(0) = a_z(0) = 0$, $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$; $u^1(x)$, ..., $\gamma^{11}(x)$ — решения задач Коши для уравнений (13), приведенных к такому виду и при таких начальных условиях, что для каждого i -го решения только одной из искомых переменных группы (14), соответствующей константе C_i , задано единичное значение, а всем остальным параметрам и правым частям уравнений (13) присвоены нулевые значения. Указанные задачи Коши решались путем интегрирования системы (13) методом Рунге — Кутты 4 порядка.

Располагая функциями $u^1(x)$, ..., $w^q(x)$ для каждого из N упругих звеньев, можно, используя по тринадцать условий сопряжения (8)–(11) каждых смежных звеньев и равенство $M_{y,n}(0) = M_n^e$, вытекающее из условия наличия в n -ом соединительном шарнире внешнего управляющего момента, а также условия в начале $x_1 = 0$ первого звена и условия на конце $x_N = l_N$ последнего звена, подсчитать $13N$ параметров, содержащих $11N$ констант C_i , N угловых ускорений вращений вокруг осей $O_n x_n$ ($n = 1, \dots, N$) и N угловых ускорений $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\psi}_k$, $\dot{\theta}_1$ относительных поворотов примыкающих звеньев.

Определив состояние упругого манипулятора в момент времени $t + \Delta t$, можно переходить к следующему шагу вычислительного процесса и определять состояние системы в момент $t + 2\Delta t$. Для этого вначале с помощью метода предиктор-корректор

Адамса — Башфорта на основе найденных для каждого из узлов значений φ , ψ , v , ω_x , ω_y , ω_z , ε_x , ε_y , ε_z , вычисленных в моменты времени $t + \Delta t$, t , $t - \Delta t$, $t - 2\Delta t$, подсчитываются значения этих величин в момент времени $t + 2\Delta t$. Затем на этом же шаге вычисляются матрицы $B_{n-1,n}$, $\dot{B}_{n-1,n}$. С помощью матриц $B_{n-1,n}$ вычисляем матрицы (Накано, 1988)

$$A_n = B_{0,1} \cdot B_{1,2} \cdots B_{n-1,n}.$$

После этого, располагая состояниями системы в моменты времени $t - \Delta t$, t , $t + \Delta t$, можно по описанной выше схеме определять ее состояние в момент $t + 2\Delta t$ и т. д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера, иллюстрирующего применение предложенного подхода, рассмотрим плоский упругий двузвенник, шарнирно присоединенный концом первого стержня к стабилизированной в орбитальной системе координат платформе. Два одинаковых звена равной длины l соединены между собой цилиндрическим шарниром. К концу второго звена присоединено твердое тело массы M . Выбраны следующие значения параметров системы:

$$\rho l / E g = 3.049 \cdot 10^{-9},$$

$$J / l^2 F = 3.066 \cdot 10^{-1},$$

$$\bar{m} = m / \rho l F = 8.11 \cdot 10^{-1},$$

$$\bar{q} = q l / E F = 3.666 \cdot 10^{-7}.$$

Чтобы показать, что необходимость моделирования упругого робота континуальной системой может возникать даже при сравнительно гладких управляющих воздействиях, приложенные в шарнирах управляющие моменты выберем в таком виде, в котором практически отсутствуют режимы разгона и торможения. Безразмерные значения их составляют

$$\begin{aligned} \bar{M}_1^e(t) = \bar{M}_2^e(t) &= l \cdot \bar{M}_1^e(t) / EJ = l \cdot \bar{M}_2^e(t) / EJ = \\ &= 6.179 \cdot 10^{-5} (1 - \cos 6t). \end{aligned}$$

Состояние системы описывается углами $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ отклонения стержней от вертикали и функциями упругих прогибов стержней $w_1(x_1, t)$, $w_2(x_2, t)$. Было принято, что в исходном состоянии

$$\begin{aligned} \varphi_1(0) = \varphi_2(0) &= 0, & \dot{\varphi}_1(0) = \dot{\varphi}_2(0) &= 0, \\ w_1(x_1, 0) &= 0, & w_2(x_2, 0) &= 0, \\ \dot{w}_1(x_1, 0) &= 0, & \dot{w}_2(x_2, 0) &= 0. \end{aligned}$$

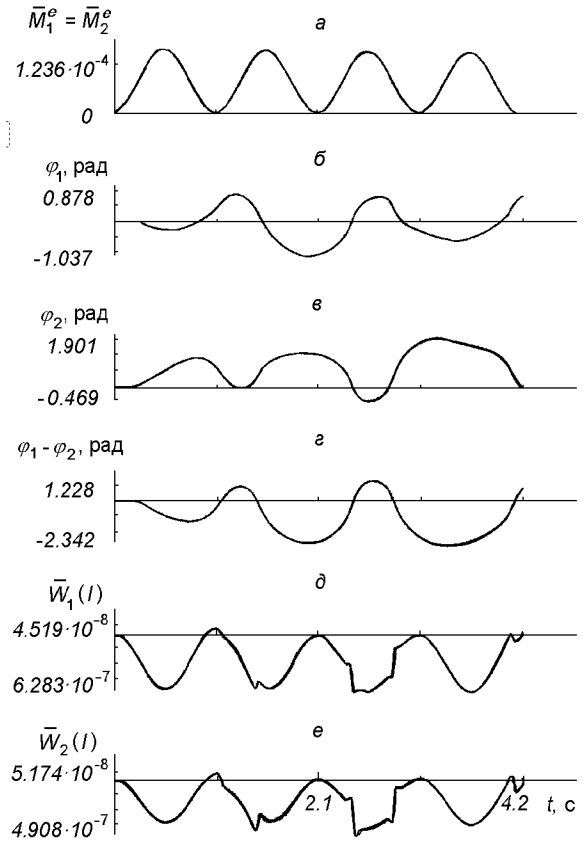


Рис. 1. Зависимости управляющего момента $M_1^e(t)$ (а), углов поворотов $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ (б—г) и упругих перемещений $\bar{w}_1$, $\bar{w}_2$ концов звеньев 1, 2 (д, е)

Динамическое поведение системы анализировалось на отрезке времени $0 \leq t \leq 4.2$ с. Интегрирование по времени осуществлялось с шагом $\Delta t = 2.5 \cdot 10^{-3}$ с, при построении частных решений уравнений упругого деформирования стержней их длина разбивалась на 100 участков интегрирования.

На рис. 1 показаны функции изменения во времени управляющего момента $M_1^e(t)$, углов поворотов $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, их разности $\varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ и упругих перемещений $\bar{w}_1 = w_1(l, t) / l$, $\bar{w}_2 = w_2(l, t) / l$ концов стержней. Можно заметить, что эти функции имеют гладкий характер за исключением кривых $\bar{w}_1(t)$, $\bar{w}_2(t)$, которые содержат участки быстрого изменения в окрестности состояния $\varphi_1(t) \approx \varphi_2(t)$, когда осевые линии стержней ориентированы вдоль одной прямой и общий момент инерции системы принимает максимальное значение.

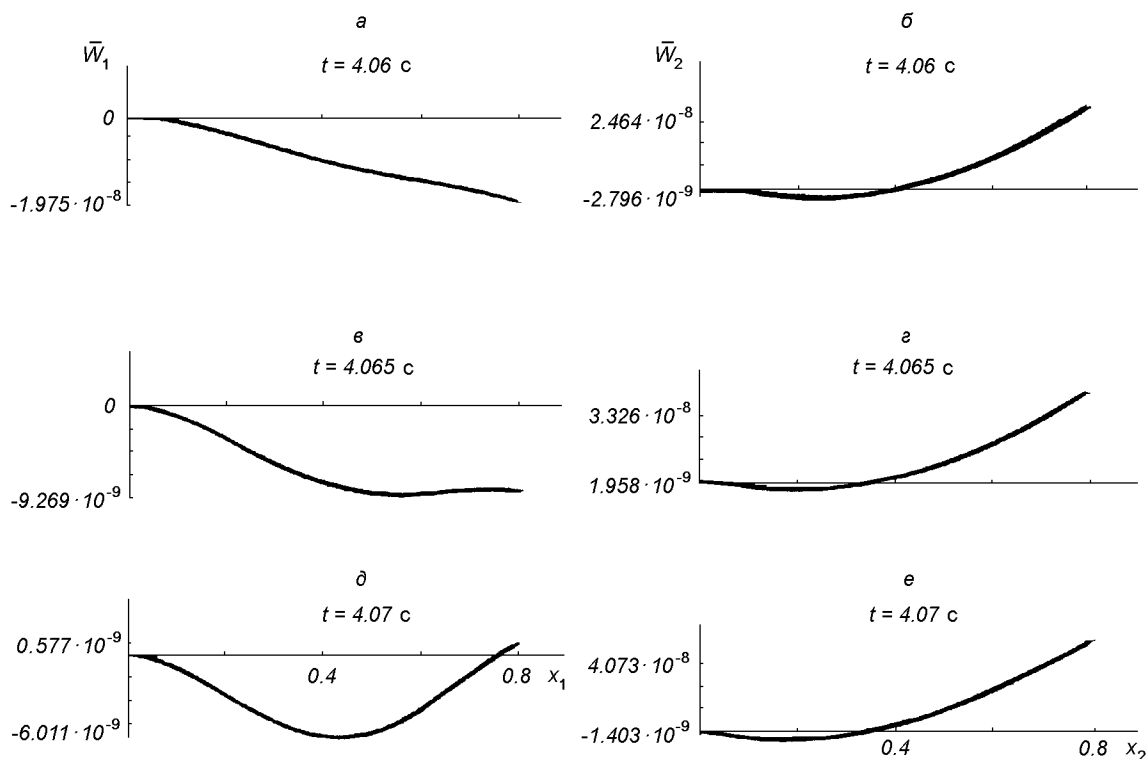


Рис. 2. Формы упругих линий $\bar{w}_1(x_1)$, $\bar{w}_2(x_2)$ звеньев в моменты времени $t = 4.06$ с (а, б), 4.065 с (в, г), 4.07 с (д, е)

На этих участках времени более сложный вид имеют и формы упругих линий звеньев, что особенно характерно для второго стержня. На рис. 2 показаны функции $\bar{w}_1(x_1)$, $\bar{w}_2(x_2)$, соответственно в моменты времени $t = 4.06$ с (а, б), 4.065 с (в, г), 4.07 с (д, е). Отметим, что в другие моменты времени (при $\varphi_1(t) \neq \varphi_2(t)$) эти кривые имеют прямое очертание и могут быть описаны малым числом аппроксимирующих параметров.

Акуленко Л. Д., Гукасян А. А. Управление плоскими движениями упругого звена манипулятора // Изв. АН СССР. Механика твердого тела.—1983.—№ 5.—С. 33—41.

Акуленко Л. Д., Михайлов С. А., Черноусько Ф. Л. Моделирование динамики манипулятора с упругими звеньями. // Изв. АН СССР. Механика твердого тела.—1981.—№ 3.—С. 118—124.

Накано Э. Введение в робототехнику. — М.: Мир, 1988.—334 с.
Гуляев В. И., Гайдайчук В. В., Кошкин В. Л. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней. — К.: Наук. думка, 1992.—344 с.

Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы. — М.: Наука, 1989.—367 с.

Chapnik B. V., Heppler G. R., Aplevich J. D. Modeling Impact on a

One-Link Flexible Robotic Arm // IEEE Trans. Robotics and Automation.—1991.—7, N 4.—P. 479—488.

Kirk C. L., Oria A., Hammer F. Slewing Dynamics and Vibration Control of Flexible Space Shuttle Remote Manipulator // AAS // AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Halifax, Canada, 1995.—19 p.

Wen-Jieh Wang, Shui-Shong Lu, Chen-Fa Hsu. Experiments on the Position Control of a One-Link Flexible Robot Arm // IEEE Trans. Robotics and Automation.—1989.—5, N 3.—P. 373—377.

Yossi Chait, Milan Miklavcic, Maccluer C. R., Clark J. Radcliffe. A Natural Modal Expansion for the Flexible Robot Arm Problem Via a Self-Adjoint Formulation // IEEE Trans. Robotics and Automation.—1990.—6, N 5.—P. 601—603.

DYNAMICS OF SPACE ELASTIC ROBOT-MANIPULATOR

V. I. Gouliaev and T. V. Zavrzhina

The problem about elastic vibrations of a space robot-manipulator with distributed parameters is stated. A hybrid-type system of differential equations is constructed, a technique for its solution based on the use of the Hubolt numerical method and transfer matrix is proposed. An example is considered.

УДК 358.111.6

**Об использовании радионавигационных систем
наблюдения космического базирования
при летных испытаниях элементов
авиационных космических ракетных комплексов**

С. П. Куликов

Центральный научно-дослідний інститут МО України, Київ

Надійшла до редакції 22.11.96

Використовуючи запропонований алгоритм побудови радіонавігаційних карт радіонавігаційних систем спостереження космічного базування NAVSTAR та ГЛОНАСС приводиться аналіз впливу геометричного фактору на точність визначення координат елементів авіаційних космічних ракетних комплексів при проведенні льотно-конструкторських випробувань.

Авиационный космический ракетный комплекс (АКРК) включает следующие элементы: самолет-носитель (СН), ракету космического назначения (РКН), космический аппарат (КА), технический комплекс (ТК), стартовый комплекс (СК), объекты обеспечения.

Информационное обеспечение пусков элементов АКРК (СН, РКН и КА) навигационной информацией в процессе проведения летно-конструкторских испытаний, является новой и достаточно сложной задачей. Основная трудность ее решения заключается в том, что пуск РКН с авиационного СК в процессе штатной эксплуатации авиационного космического ракетного комплекса предполагается проводить с любой точки околоземного пространства (преимущественно в зоне Черноморского бассейна и в экваториальной зоне), что предполагает отсутствие в точке старта и по трассе полета, наземных структур измерительного комплекса. Поэтому формирование измерительного комплекса на этапе эксплуатации АКРК может основываться на использовании радионавигационных систем наблю-

дения космического базирования (РНЧН КБ). В частности могут быть использованы уже существующие РНЧН КБ NAVSTAR (США) и ГЛОНАСС (Россия).

Использование РНЧН КБ оправдано тем, что аппаратура потребителей (АП) этих систем используется, во-первых, как высокоточная помехоустойчивая аппаратура для бомбардировщиков (обеспечивает слепое бомбометание и выдачу сигналов для первоначальной установки инерциальных систем наведения ракет), высокоманевренных истребителей (сигналы от этой аппаратуры используются для коррекции инерциальных навигационных систем), подводных лодок, кораблей и средств наземного транспорта, сухопутных войск (ранцевый вариант), наведения ракет на активном участке траектории, радиоконтроля околоземных орбит космических аппаратов, а, во-вторых, как дешевая аппаратура для коммерческого использования.

Данная работа предполагает решение только задач определения параметров движения самолета-носителя и ракеты космического назначения на

активном участке полета с помощью радионавигационных систем наблюдения космического базирования.

Если каждой точке трехмерного пространства поставить в соответствие точность навигационных определений, получаемую в этой точке по исследуемой сети навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ), то в пространстве образуется так называемое поле точности данной РНС КБ. В данной статье мы ограничимся поверхностью Земли, для которой и проведем расчеты величин геометрического фактора. Во многих работах приводятся расчеты для трех и четырех НИСЗ видимых из данной точки поверхности Земли. При этом возникает необходимость выбора оптимального созвездия. Однако в настоящее время аппаратура потребителя в состоянии использовать все видимые НИСЗ, и за счет этого существенно повысить точностные характеристики определения своего местоположения (в частности, наряду с четырехканальной аппаратурой используется уже пяти-, шести- и более).

В качестве РНС КБ, как уже отмечалось, рассмотрим системы NAVSTAR и ГЛОНАСС. В первой системе используется 18 НИСЗ, разнесенных на шести орбитах (по 60°) и по три НИСЗ на орбите (разнесены по 120°). Наклонение орбит равно 55° . Сдвиг орбит равен 20° . В системе ГЛОНАСС используется 24 НИСЗ, разнесенных на трех орбитах (по 120°) и по восемь НИСЗ на орбите (разнесены по 45°). Наклонение орбит равно 63° . Сдвиг орбит равен 15° (Дмитриев, Шебшаевич, 1982; Мищенко и др., 1980).

Высоты полета НИСЗ равны: для NAVSTAR — 20 000 км, ГЛОНАСС — 19 100 км. Периоды обращения примерно по 12 ч. Координаты НИСЗ в гироскопической геоцентрической системе координат вычислялись по формулам

$$X(t) = R[\cos\Omega\cos U(t) - \sin\Omega\cos i\sin U(t)],$$

$$Y(t) = R[\sin\Omega\cos U(t) + \cos\Omega\cos i\sin U(t)],$$

$$Z(t) = R[\sin i\sin U(t)].$$

Здесь R — радиус орбиты НИСЗ, Ω — долгота восходящего узла, i — наклонение орбиты, $U(t)$ — аргумент широты.

Вычисление НИСЗ, видимых аппаратурой потребителя, производится по формуле

$$D_{\text{НИСЗ}} \leq D_{\text{кр}},$$

где $D_{\text{НИСЗ}}$ — расстояние между НИСЗ и АП, $D_{\text{кр}}$ — критическая дальность.

Критическая дальность вычисляется по формуле

$$D_{\text{кр}} = \frac{(R_3 + H)\sin[\pi/2 - \alpha - \arcsin[R_3\sin(\pi/2 + \alpha)/(R_3 + H)]]}{\sin(\pi/2 + \alpha)},$$

где R_3 — средний радиус Земли, H — высота полета НИСЗ, α — угол места видимости НИСЗ (принимается равным 10°).

Исходные данные для проведения расчетов (разнос НИСЗ по орбитам и долготы восходящих узлов) приводятся в табл. 1 (NAVSTAR) и табл. 2 (ГЛОНАСС).

Данные табл. 1 и 2 являются модельными; при практической реализации необходимо использовать реальные альманахи.

Таблица 1. Разнос НИСЗ по орбитам и долготам восходящих узлов для системы NAVSTAR

Номер орбиты	НИСЗ			Ω
	1	2	3	
1	10	130	250	-4.88
2	30	150	270	55.13
3	50	170	290	115.13
4	70	190	310	175.13
5	90	210	330	235.13
6	110	230	350	295.13

Таблица 2. Разнос НИСЗ по орбитам и долготам восходящих узлов для системы ГЛОНАСС

Номер орбиты	НИСЗ								Ω
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	10	55	100	145	190	235	280	325	-4.88
2	25	70	115	160	205	250	295	340	115.13
3	40	85	130	175	220	265	310	355	235.13

На рис. 1—4 показано в зависимости от широты B и долготы L поверхности Земли количество видимых космических аппаратов и качественные характеристики значений геометрического фактора. При этом для большого количества видимых аппаратов данные характеристики практически совпадают. На рис. 3 цифрами 0, 1, 2 отмечено 10, 11, 12 НИСЗ соответственно. Расчеты выполнены для северного полушария, для южного радионавигационные карты будут симметричными. Значения геометрического фактора определялись по формуле

$$\Gamma\Phi = \sqrt{\text{Sp}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}}.$$

Здесь $\mathbf{A}$ — матрица частных производных от измеряемых параметров по определяемым, Sp — след результирующей матрицы.

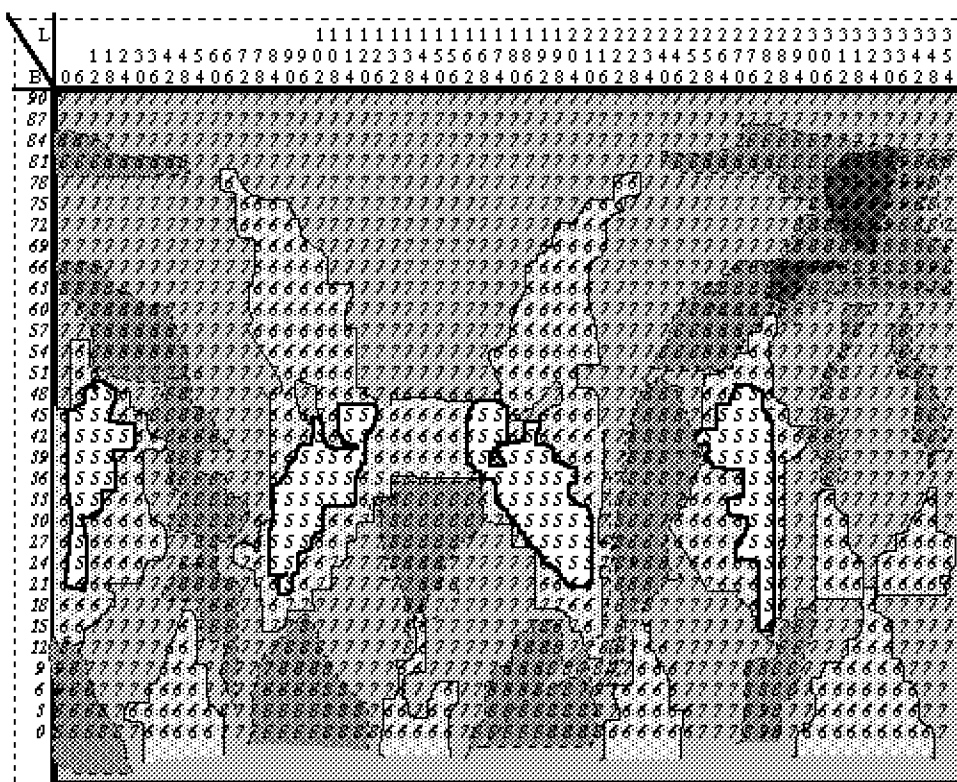


Рис. 1. Количество КА видимых аппаратурой потребителя системы NAVSTAR

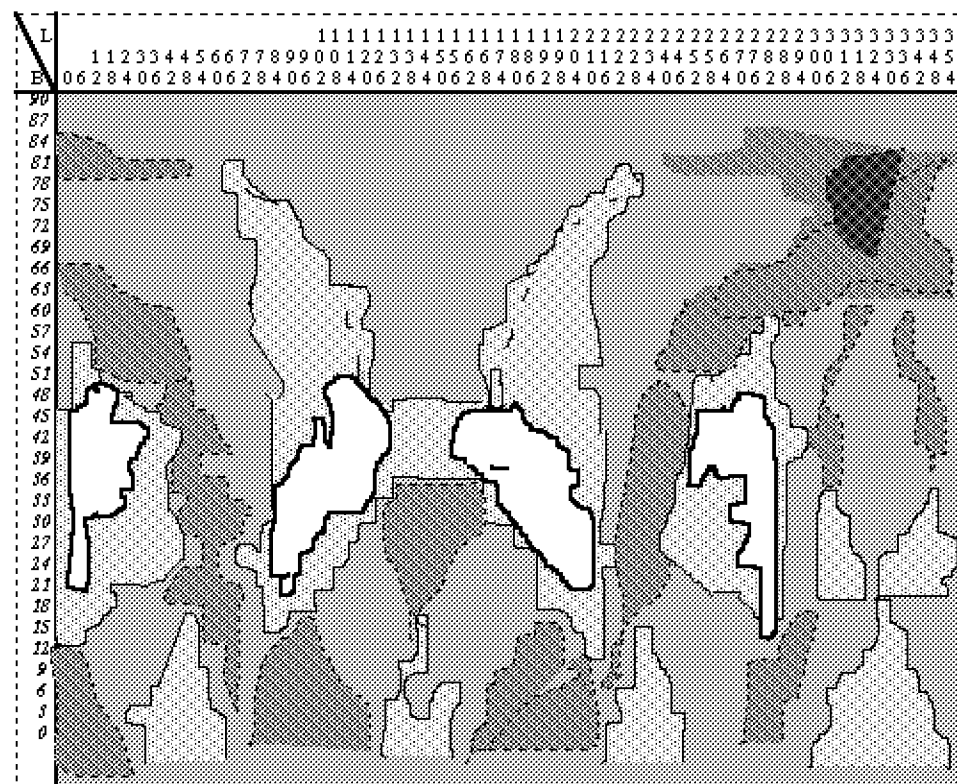


Рис. 2. Качественные характеристики значений геометрического фактора системы NAVSTAR

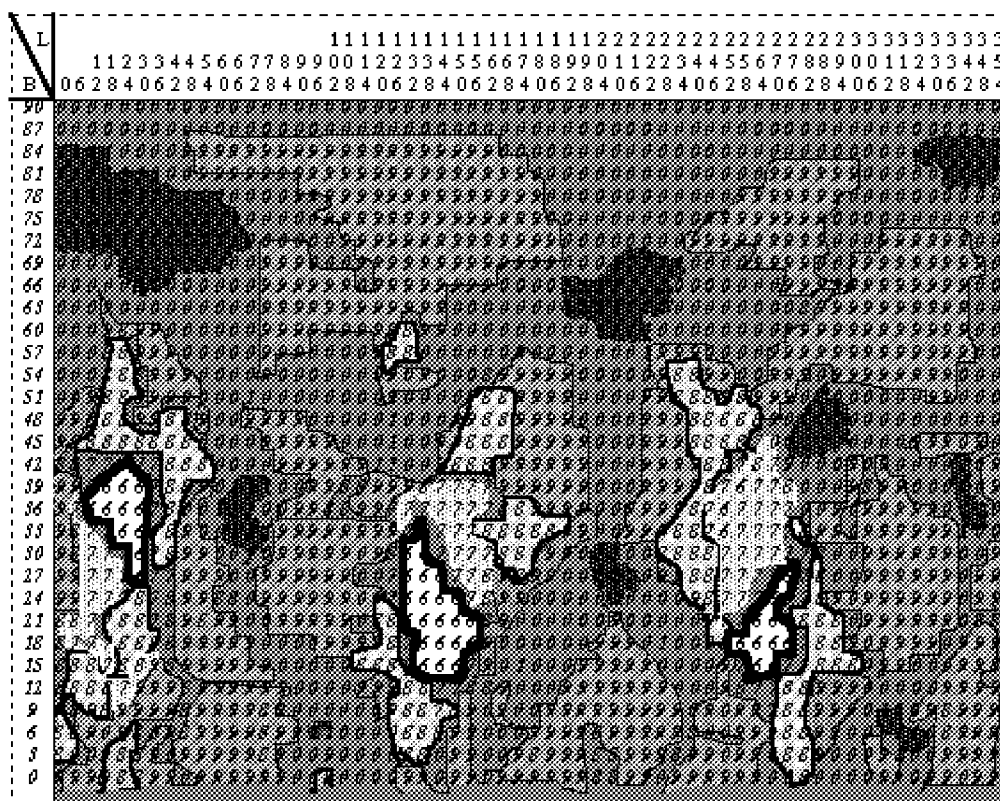


Рис. 3. Количество КА видимых аппаратурой потребителя системы ГЛОНАСС

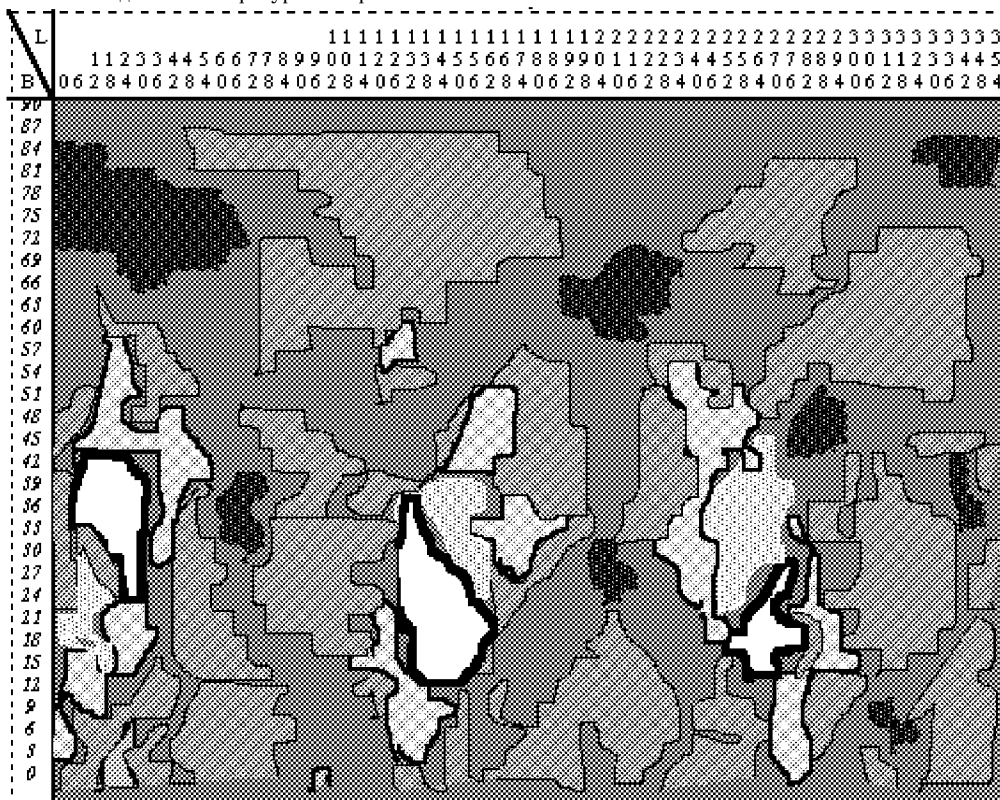


Рис. 4. Качественные характеристики значений геометрического фактора системы ГЛОНАСС

На рис. 2 и 4 области высокой точности светлее, чем области низкой точности (всего шесть градаций).

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что система NAVSTAR в существующем виде может обеспечить видимость шести—восьми НИСЗ, система ГЛОНАСС — девяти—десяти НИСЗ.

Из рисунков также видно, что изменение навигационного поля в процессе полета изделия может быть довольно значительным. Поэтому использованию РНСН КБ для изделий с большой дальностью и временем полета должно предшествовать детальное изучение навигационных карт, полученных на момент начала летно-конструкторских испытаний.

Использование РНСН КБ вполне возможно и оправдано для ракет космического назначения, особенно для случаев, когда траектории пусков не обеспечиваются наземными измерителями.

Необходимо отметить, что РНСН КБ NAVSTAR и ГЛОНАСС обеспечивают навигационными данными трассу в районе Черноморского бассейна на 5—15 % хуже, чем в целом по остальной поверхности Земли. Это необходимо учитывать при использовании аппаратуры устанавливаемой на объекты испытаний (ОИ). Точностные характеристики в этом случае будут хуже штатных.

Количество КА, видимых аппаратурой потребителя при совместном использовании систем NAVSTAR и ГЛОНАСС, при запусках АКПК может быть получено наложением результатов, полученных для каждой из них.

В настоящее время уже известен класс траекторий элементов АКПК, требуемые точностные характеристики определения параметров движения ОИ, требования к системе единого времени.

Необходимо для каждой из траекторий провести исследования по:

- изучению характера изменения измеряемых навигационных параметров при движении ОИ

по траектории;

- изучению основных факторов, определяющих точность измерения параметров движения, найти функциональную зависимость измеряемых параметров от этих факторов;
- установлению требуемого состава измеряемых параметров и требуемую точность измерений на основе оценки влияния погрешностей измерений на точность определения движения ОИ по результатам наблюдений;
- составу средств, включаемых в измерительный комплекс; выбору моделей движения ОИ;
- выбору методов решения уравнения движения ОИ;
- оцениванию вероятных характеристик погрешностей измерений по экспериментальным данным.

После этого можно сделать окончательный вывод об использовании радионавигационной системы наблюдения космического базирования в условиях той или иной трассы.

Дмитриев П. П., Шебшаевич В. С. (ред.). Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1982.— 272 с.

Мищенко И. Н., Волынкин А. И., Волосов П. С. и др. Глобальная навигационная система NAVSTAR // Зарубежная радиоэлектроника.—1980.—№ 8.—С. 52—83.

ON THE USE OF SPACE-BASED RADIO NAVIGATIONAL OBSERVATION SYSTEMS IN FLIGHT TESTS OF AEROSPACE ROCKET SYSTEM ELEMENTS

S. P. Kulikov

Based on the algorithm proposed for the construction of radio navigational charts for space-based radio navigational observation systems NAVSTAR and GLONASS, we analyze the effect of geometric factor on the accuracy of the coordinates of the elements of aerospace rocket systems determined in design test flights.

УДК 523.112

Катализ протонного распада в теории суперструн

Ю. М. Малюта¹, В. Ф. Губарев², Н. Н. Аксенов², Т. В. Обиход¹

¹ Институт ядерных исследований НАН Украины, Київ

² Институт космических исследований НАН Украины, НКАУ, Київ

Надійшла до редакції 25.07.97

Теорію суперструн на многовидах Калабі-Яу застосовано до вивчення каталізу протонного розпаду.

ВВЕДЕНИЕ

Рубаков (1981) и Каллан (1982) показали, что теории великого объединения, не сохраняющие барионное число, предсказывают существование индуцированного монополю распада протона. Недавно было доказано, что модели Калаби-Яу описывают солитонные объекты теории суперструн (Aldazabal et al., 1995).

Цель данной работы — исследовать индуцированный распад протона в контексте моделей Калаби-Яу.

В течение последних нескольких лет был достигнут значительный прогресс в теории суперструн, компактифицированных на многообразиях Калаби-Яу (Berglund et al., 1995; 1996). Особенно плодотворной оказалась идея дуальности между гетеротическими струнами и струнами типа II. Новые методы позволили исследовать суперструнные вакуумы и фазовые переходы между ними. Этот подход очень важен, так как он дает новые предсказания для будущих экспериментальных поисков.

РЕАКЦИЯ КАТАЛИЗА

Рассмотрим инстантонные числа — топологические инварианты рациональных кривых (Berglund et al., 1995) — для многообразий Калаби-Яу $X_{24}(1, 1, 2, 8, 12)_{-480}^{3,243}$ и $X_{20}(1, 1, 2, 6, 10)_{-372}^{4,190}$ (табл. 1 и 2).

Вычисление этих чисел проводилось с помощью компьютерной программы INSTANTON. Из табл. 1

Таблица 1. Инстантонные числа для $X_{24}(1, 1, 2, 8, 12)_{-480}^{3,243}$

(0,0,1)	-1	(0,1,1)	-1	(0,1,2)	-2	(0,1,3)	-3
(0,1,4)	-4	(0,1,5)	-5	(0,2,3)	-3	(0,2,4)	-16
(1,0,0)	240	(1,0,1)	240	(1,1,1)	240	(1,1,2)	720
(1,1,3)	1200	(1,1,4)	1680	(1,2,3)	1200	(2,0,0)	240
(2,0,2)	240	(2,2,2)	240	(3,0,0)	240	(3,0,3)	240
(4,0,0)	240	(5,0,0)	240	(6,0,0)	240	(0,1,0)	0

Таблица 2. Инстантонные числа для $X_{20}(1, 1, 2, 6, 10)_{-372}^{4,190}$

(0,0,0,1)	28	(0,0,0,2)	-1	(0,0,0,3)	0	(0,0,1,0)	-1
(0,1,0,0)	0	(0,1,1,0)	-1	(0,1,2,0)	-2	(0,1,3,0)	-3
(0,1,4,0)	-4	(0,1,5,0)	-5	(0,2,3,0)	-3	(0,2,4,0)	-16
(0,2,5,0)	-55	(0,2,6,0)	-144	(0,3,4,0)	-4	(0,3,4,0)	-4
(0,3,5,0)	-55	(1,0,0,0)	-1	(1,0,0,1)	28	(1,0,0,2)	186
(1,0,0,3)	28	(1,0,0,4)	-1				

и 2 можно получить следующее соотношение между инстантонными числами

$$n_{a, b, c} = \sum_k n_{a, b, c, k} \cdot \quad (1)$$

Соотношение (1) описывает фазовый переход между солитонными объектами, спектры которых представлены в табл. 3.

Эти спектры вычисляются путем применения

Таблица 3. Спектры солитонных объектов

Калаби-Яу	Спектр	Калибровочная группа	Ранг группы
$X_{24}(1,1,2,8,12)_{-480}^{3,243}$	244 1	$U(1)^4$	4
$X_{20}(1,1,2,6,10)_{-372}^{4,190}$	28 2 + 191 1	$SU(2) \times U(1)^4$	5

техники инстантонных чисел (Berglund et al., 1996):

$$\begin{array}{c} 240 \\ \hline 4 + 1 \\ \hline \boxed{244} + 1 \end{array} = -1 + \boxed{28} + 186 + \boxed{28} - 1 \quad \begin{array}{c} 5 \\ \hline \boxed{191} \end{array} \quad (2)$$

Мы заключаем из (2), что солитонный объект $Sol = (244 \ 1)$ состоит из 244 синглетных гипермультиплетов, а солитонный объект $Sol^* = (28 \ 2 + 191 \ 1)$ состоит из 28 дублетных гипермультиплетов и 191 синглетного гипермультиплета; причем существует фазовый переход

$$Sol^* \longrightarrow Sol + H, \quad (3)$$

где H является синглетным гипермультиплетом.

Комбинируя (3) с кварковой диаграммой распада протона, мы конструируем диаграмму катализа

$$\begin{array}{ccc} p & \rightleftharpoons & \bigcirc \longrightarrow e^+, \\ & & \downarrow \uparrow H \\ Sol^* & \Rightarrow & \bigcirc \Rightarrow Sol. \end{array} \quad (4)$$

ОЦЕНКИ ГРАНИЦ

Реакция (4) сопровождается энергосвободением $\varepsilon \approx m_H$, где мы приравняем m_H массе хиггсова бозона 1000 ГэВ (Particle Data Group, 1996). Для оценки сечения реакции (4) применим прием Окуны (1981). Этот прием продемонстрирован в табл. 4, где $\alpha_{12} = g_1 g_2$, g_1 и g_2 являются эффективными константами связи, представляющими вершины диаграммы (4).

Идентифицируя в формуле для σ константу α_{12} с константой великого объединения $\alpha_{GU} \approx 1/40$ (Окунь, 1981), найдем верхнюю границу сечения реакции катализа

$$\sigma \approx 10^{-28} \text{ см}^2.$$

В последнее время ведутся интенсивные поиски солитонных объектов типа неабелевых монополей в космических лучах (Ahlen et al., 1994; Becker-

Таблица 4. Размерная оценка наблюдаемых параметров

Амплитуда реакции (4)	Вероятность реакции (4)	Сечение реакции (4)
$A = \alpha_{12} m_H^{-2}$	$\omega = A^2 \varepsilon^5 = \alpha_{12}^2 m_H$	$\sigma = \omega^{-2} = (\alpha_{12}^2 m_H)^{-2}$

Szendy et al., 1994). Формула

$$F = (4\pi\sigma\tau)^{-1},$$

связывающая поток монополей в космических лучах F с сечением реакции катализа σ и временем жизни протона $\tau \approx 10^{32}$ лет (Particle Data Group, 1996), определяет верхнюю границу потока

$$F \approx 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}. \quad (5)$$

Экспериментальный интерес представляет реализация поиска монополей путем установки на орбитальной станции типа «Альфа» сцинтилляционного детектора с эффективным сечением 10^4 см^2 . Согласно оценке (5) такой детектор будет регистрировать один монополю за время экспозиции — один год.

- Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. — М.: Наука, 1981.—304 с.
 Рубаков В. А. Сверхтяжелые магнитные монополи и распад протона // Письма в ЖЭТФ.—1981.—33.—С. 658—660.
 Ahlen S., Ambrosio M., Antolini R., et al. Search for slowly moving magnetic monopoles with the MACRO detector // Phys. Rev. Lett.—1994.—72.—P. 608—612.
 Aldazabal G., Font A., Ibañez L. E., et al. Chains of $N = 2$, $D = 4$ heterotic/type II duals // hep-th/9510093.
 Becker-Szendy R., Bratton C. B., Breault J., et al. New magnetic monopole flux limits from the IMB proton decay detector // Phys. Rev.—1994.—D49.—P. 2169—2173.
 Berglund P., Katz S., Klemm A. Mirror symmetry and the moduli space for generic hypersurfaces in toric varieties // Nucl. Phys.—1995.—B456.—P. 153—204.
 Berglund P., Katz S., Klemm A., et al. New Higgs transitions between dual $N = 2$ string models // hep-th/9605154.
 Callan C. G. Dyon-fermion dynamics // Phys. Rev.—1982.—D26.—P. 2058—2068.
 Particle Data Group. Review of Particle Physics // Phys. Rev.—1996.—D54, N 1, Part I.

CATALYSIS OF PROTON DECAY IN SUPERSTRING THEORY

Yu. M. Malyuta, V. F. Gubarev, N. N. Aksenov, and T. V. Obikhod

Theory of superstrings on Calabi-Yau manifolds is applied to the investigation of proton decay catalysis.

УДК 681.51.015

Формализация дискретных рекурсивных корректирующих алгоритмов с моделью для машинного синтеза

В. Г. Зотов

Спілка вчених Харкова, Харків

Надійшла до редакції 15.04.97

Розглядається один з можливих варіантів формування лінійних дискретних рекурсивних коректуючих алгоритмів з моделлю, z -передаточна функція яких представляється дробово-раціональною функцією. Формалізація проведена на основі методів оптимізації, використання феноменологічної моделі об'єкта управління, багатополіномної апроксимації сигналу.

Для построения задачи машинного синтеза линейных дискретных рекурсивных корректирующих алгоритмов с моделью (ДНКАМ) необходимо их формальное математическое описание. Согласно определения z -передаточная функция дискретного рекурсивного корректирующего алгоритма имеет следующий вид

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^k N_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^p N'_i z^{-i}}, \quad (1)$$

где N_i , N'_i — вещественные коэффициенты; $X(z)$, $Y(z)$ — z -изображения входного и выходного сигналов соответственно; k , p — порядок полиномов числителя и знаменателя z -передаточной функции соответственно; z — оператор z -преобразования.

Задача состоит в построении метода формализации ДРКАМ вида (1), отвечающего требованиям:

1. Возможности подстройки параметров феноменологической модели;
2. Сокращение времени подстройки за счет выбора прогрессивных процедур организации поиска экстремума функционала;
3. Автоматизации процесса синтеза ДРКАМ с заданными свойствами;
4. Гибкости при переходе от одной структуры алгоритма к другой.

Перечисленным выше требованиям может отвечать дискретный нерекурсивный корректирующий алгоритм (Зотов, 1988), охваченный отрицательной

обратной связью.

Такой подход существенно упрощает построение z -передаточной функции ДРКАМ, которая принимает вид

$$W(z) = \frac{W'(z)}{1 + W'(z)W_{oc}(z)}, \quad (2)$$

где $W'(z)$ — z -передаточная функция нерекурсивного корректирующего алгоритма с моделью (ДНКАМ); $W_{oc}(z) = k_{oc}$ — z -передаточная функция звена в обратной связи алгоритма.

Осуществив подстановку выражений для нерекурсивного корректирующего алгоритма в выражение (2) и проделав преобразования, получим

$$W^p(z) = \frac{\sum_{i=0}^k N_i z^{k-i}}{N'_0 z^k + \sum_{i=1}^k N'_i z^{k-i}}, \quad (3)$$

где $N'_0 = 1 + k_{oc}N_0$; $N'_i = k_{oc}N_i$, $i = 1, \dots, k$; $W^p(z)$ — z -передаточная функция дискретного рекурсивного корректирующего алгоритма.

Разделив числитель и знаменатель выражения (3) на $N'_0 z^k$, приведем его к стандартному виду

$$W^p(z) = \frac{\sum_{i=0}^k \bar{N}_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^k \bar{N}'_i z^{-i}}, \quad (4)$$

где $\bar{N}_i = \frac{N_i}{N'_0}$, $i = 0, \dots, k$; $N'_0 = 1 + k_{oc}N_0$; $\bar{N}'_i = \frac{N'_i}{N'_0}$;

$$N'_i = k_{oc} N_i; N_i = \eta \lambda'_i + \gamma \lambda''_i, i = 0, \dots, k.$$

Для комплексно-сопряженных корней модели:

$$\begin{aligned}\lambda'_i &= \exp\left[-\frac{\varphi(k-i)}{2}\right] \cos\Theta(k-i); \\ \lambda''_i &= \exp\left[-\frac{\varphi(k-i)}{2}\right] \sin\Theta(k-i); \\ \eta &= \exp\left(-\frac{\varphi m}{2}\right) (E_1 \cos m\Theta - E_2 \sin m\Theta); \\ \gamma &= \exp\left(-\frac{\varphi m}{2}\right) (D_1 \sin m\Theta - E_2 \cos m\Theta); \\ E_1 &= \frac{2[1 - \exp(\varphi)][1 + \exp(2\varphi) - 2\exp(\varphi)\cos\Phi] B'_1}{B'_1 A' - B'^2 [1 - \exp(\varphi)]^2}; \\ E_2 = D_2 &= \frac{2[1 - \exp(\varphi)]^2 [1 + \exp(2\varphi) - 2\exp(\varphi)\cos\Phi] B'}{B'_1 A' - B'^2 [1 - \exp(\varphi)]^2}; \\ D_1 &= \frac{2[1 - \exp(\varphi)][1 + \exp(2\varphi) - 2\exp(\varphi)\cos\Phi] A'}{B'_1 A' - B'^2 [1 - \exp(\varphi)]^2}; \\ A' &= -\exp(\varphi)[\cos\Phi + 1] + \exp(2\varphi)(3\cos\Phi + 1) + \\ &\quad + \exp(-\varphi k)(1 + \cos k\Phi) - \\ &\quad - \exp[-\varphi(k-1)][\cos\Phi(k+1) + 2\cos\Phi + \cos k\Phi] + \\ &\quad + \exp[-\varphi(k-2)][1 + \cos\Phi(k+1)] - 2\exp(3\varphi); \\ B'_1 &= [\exp(\varphi) + \exp(2\varphi)](\cos\Phi + 1) + \\ &\quad + \exp(-\varphi k)(1 - \cos k\Phi) + \\ &\quad + \exp[-\varphi(k-1)][\cos\Phi(k+1) - 2\cos\Phi + \cos k\Phi] + \\ &\quad + \exp[-\varphi(k-2)][1 - \cos\Phi(k+1)]; \\ B' &= \exp(\varphi)\sin\Phi - \exp[-\varphi(k-1)]\sin\Phi(k+1) + \\ &\quad + \exp(-\varphi k)\sin\Phi k; \\ \varphi &= 2\alpha T_1; \quad \Phi = 2\Theta; \quad \Theta = \beta T_1;\end{aligned}$$

α и β — реальная и мнимая части корней модели объекта управления; T_1 — период прерывания; m — число тактов прерывания в периоде аппроксимации.

Для действительных равных корней модели:

$$\begin{aligned}\lambda'_i &= \exp\left[-\frac{\varphi(k-i)}{2}\right]; \\ \lambda''_i &= (k-i)\exp\left[-\frac{\varphi(k-i)}{2}\right]; \\ \eta &= \exp\left(-\frac{\varphi m}{2}\right) (E_1 - D_2 m T_1); \\ \gamma &= \exp\left(-\frac{\varphi m}{2}\right) (D_1 m T_1 - E_2); \\ E_1 &= \frac{B'_1 [1 - \exp(\varphi)]}{B'_1 A' - B'^2}; \quad E_2 = \frac{[1 - \exp(\varphi)]^2 B' T_1}{B'_1 A' - B'^2}; \\ D_1 &= \frac{[1 - \exp(\varphi)]^3}{B'_1 A' - B'^2}; \quad D_2 = \frac{[1 - \exp(\varphi)]^2 B'}{B'_1 A' - B'^2}; \\ A' &= \exp(-\varphi k) - \exp(\varphi);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B' &= T_1 \{ \exp(\varphi) + k \exp(-\varphi k) - (k+1) \exp[-\varphi(k-1)] \}; \\ B'_1 &= T_1^2 \{ k^2 \exp(-\varphi k) + (1 - 2k - 2k^2) \exp[-\varphi(k-1)] + \\ &\quad + (k+1)^2 \exp[-\varphi(k-2)] - \exp(\varphi) - \exp(2\varphi) \}; \\ \varphi &= 2\alpha T_1;\end{aligned}$$

α — действительная часть корней модели.

Для действительных разных корней модели:

$$\begin{aligned}\lambda'_i &= \exp\left[-\frac{\varphi_1(k-i)}{2}\right]; \quad \lambda''_i = \exp\left[-\frac{\varphi_3(k-i)}{2}\right]; \\ \eta &= E_1 \exp\left(\frac{\varphi_1 m}{2}\right) - D_2 \exp\left(\frac{\varphi_3 m}{2}\right); \\ \gamma &= D_1 \exp\left(\frac{\varphi_3 m}{2}\right) - E_2 \exp\left(\frac{\varphi_1 m}{2}\right); \\ E_1 &= \frac{[\exp(\varphi_1) - 1][\exp(\varphi_2) - 1]^2 B'_1}{[\exp(\varphi_2) - 1]^2 B'_1 A' - [\exp(\varphi_3) - 1][\exp(\varphi_1) - 1] B'^2}; \\ E_2 = D_2 &= \frac{[\exp(\varphi_3) - 1][\exp(\varphi_2) - 1][\exp(\varphi_1) - 1] B'_1}{[\exp(\varphi_2) - 1]^2 B'_1 A' - [\exp(\varphi_3) - 1][\exp(\varphi_1) - 1] B'^2}; \\ D_1 &= \frac{[\exp(\varphi_3) - 1][\exp(\varphi_2) - 1]^2 A'}{[\exp(\varphi_2) - 1]^2 B'_1 A' - [\exp(\varphi_1) - 1][\exp(\varphi_3) - 1] B'^2}; \\ A' &= \exp[\varphi_1(k+1)] - 1; \quad B' = \exp[\varphi_2(k+1)] - 1; \\ B'_1 &= \exp[\varphi_3(k+1)] - 1; \quad \varphi_1 = 2\lambda_1 T_1; \\ \varphi_2 &= (\lambda_1 + \lambda_2) T_1; \quad \varphi_3 = 2\lambda_2 T_1;\end{aligned}$$

λ_1, λ_2 — действительные разные корни модели.

Полученное выражение общего вида для ДРКАМ (4), позволяет определить его коэффициенты и порядок, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к системе управления в составе задачи машинного синтеза.

Зотов В. Г. Формализация эффективных дискретных корректирующих алгоритмов с моделью для машинного проектирования. — Харьков: 1988. — 9 с. — (Рукопись деп в ВИНТИ 24.05.88; № 4117-B88).

FORMALIZATION OF LINEAR DISCRETE RECURSIVE CORRECTION ALGORITHMS WITH A MODEL FOR MACHINE SYNTHESIS

V. G. Zotov

We describe a possible way for the formalization of linear discrete recursive correction algorithms with a model when these algorithms have the z-transfer function in the form of a rational function. The formalization is based on optimization methods with the use of a phenomenological model of the control subject, a multipolynomial approximation of signals.