

УДК 519.87

## С. А. Смирнов, Р. П. Терлецький

Інститут космічних досліджень НАН України та НКА України, Київ

Фізико-технічний інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ

## Математична модель оптичних передатників характеристик земної атмосфери

*Надійшла до редакції 08.11.02*

Досліджується поширення оптичного випромінювання в земній атмосфері та його спотворення. Розглянуто основні механізми трансформації оптичних сигналів, пов'язаних із молекулярним, аерозольним та турбулентним розсіянням світла, способи їхнього опису та застосування для моделювання впливу реальної атмосфери. Отримано вираз для ЧХХ атмосфери для подальшого практичного застосування при атмосферній корекції даних ДЗЗ, проведено його якісний аналіз.

### Вступ

Досвід реалізації космічних програм у попередні роки показав, що дистанційне зондування поверхні Землі з космосу — надзвичайно ефективний і перспективний метод дослідження природного середовища і природних ресурсів Землі. Разом з тим цінність отримуваних зображень великою мірою залежить від того, наскільки ефективно проводяться заходи щодо усунення втрат інформації. Основним джерелом спотворень оптичних сигналів є земна атмосфера. Світлова хвиля зазнає складних трансформацій, і постає велими складне завдання спеціальної редукції отриманих зображень. Особливо гострою ця проблема стала тепер, коли космічні апарати почали оснащуватись сучасними камерами високої роздільної здатності. Тому системний опис трансформаційних властивостей атмосфери і розробка на його основі ефективних алгоритмів отримання неспотворених зображень знаходиться серед пріоритетних завдань сучасної космічної науки.

### Основні робочі поняття та оптичні характеристики атмосфери

Основними газами, що складають навколоzemну атмосферу, є азот (78 %), кисень (21 %), вуглекислий газ (0.03 %), озон (0.0002 %). Крім них, в

атмосфері містяться інші гази, водяна пара та інші аерозолі — тверді та рідкі частки.

За своїми фізичними та оптичними властивостями атмосфера неоднорідна як в горизонтальному, так і в вертикальному напрямках. Основна маса атмосфери (99.9 %) зосереджена в шарі від 0 до 50 км. Він є визначальним у трансформації оптичних сигналів, що поступають на вход оптико-фотографічної системи. Особливе значення для оцінки впливу атмосфери на поширення випромінювання відіграє просторовий розподіл тиску, вологості, а також аерозолів, озону та інших компонентів.

Для визначення основних характеристик поширення світлового потоку розглянемо елементарний об'єм  $dV$ , на який під тілесним кутом  $d\Omega$  падає пучок світлових променів яскравості  $I$ . Цей об'єм частково поглинє, а частково розсіє падаючий на нього потік. Очевидно, що поглинutий потік дорівнює

$$d\Phi_{\pi} = \kappa I d\Omega dV, \quad (1)$$

де  $\kappa$  — показник поглинання.

Силу світла  $dI_c$ , розсіяного елементарним об'ємом у напрямку, що утворює кут  $\beta$  із напрямком падіння променя, покладемо рівною

$$dI_c = \frac{1}{4\pi} \sigma(\beta) I d\Omega dV. \quad (2)$$

Тут  $\sigma(\beta)$  — коефіцієнт розсіяння в напрямку  $\beta$ . Тоді потік, що розсіюється в усі напрямки,

дорівнює

$$\begin{aligned} d\Phi_p &= \int_{4\pi} dI_c d\Omega' = \\ &= \frac{1}{4\pi} Id\Omega dV \int_{4\pi} \sigma(\beta) d\Omega' = \sigma Id\Omega dV, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\sigma = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \sigma(\beta) d\Omega'$  — показник повного розсіяння.

Відносний кутовий розподіл розсіяного елементарним об'ємом світла описується індикаторисою розсіяння

$$x(\beta) = \sigma(\beta)/\sigma. \quad (4)$$

Разом із вище введеними оптичними характеристиками середовища також використовуються величини  $\varepsilon = \kappa + \sigma$  — показник повного послаблення та  $\Lambda = \sigma/\varepsilon$  — показник виживання фотона.

Тепер розглянемо способи опису об'єктів, що спостерігаються крізь атмосферу. Вони відрізняються не тільки яскравістю (коєфіцієнта яскравості), але й просторово-частотним розподілом яскравості, тобто просторово-частотними характеристиками (ПЧХ).

Для опису ПЧХ об'єктів аеро- та космічного спостереження знайшли широке застосування перетворення Фур'є. Нехай точкове джерело світла розташоване на площині  $x_0Oy_0$ . Дія будь-якої оптичної системи полягає в тому, що в площині зображені  $x'Oy'$  замість точки появиться деякий розподіл освітленості  $D(x', y')$ , який є наслідком aberrації, дифракції та інших ефектів. Якщо джерело знаходиться в точці з координатами  $x_0, y_0$ , то розподіл освітленості в площині зображення буде  $D(x' - qx_0, y' - qy_0)$ , де  $q$  — лінійне збільшення системи. Нарешті, якщо джерело не є точковим, а описується розподілом яскравості  $O(x, y)$ , то розподіл освітленості  $E(x', y')$  від нього в площині зображені можна отримати сумуванням освітленостей  $D(x', y')$ , які дають окремі точки об'єкта, тобто з точністю до постійного множника можна записати

$$E(x', y') = \iint O(x, y) D(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (5)$$

Співвідношення (5) є однією з основних формул, що використовуються для опису утворення зображень некогерентного об'єкта, що випромінює або відбиває світло.

Кількісну оцінку для процесу передачі просторових частот оптичною системою можна отримати зі співвідношення (5). Для цього досить, ввівши просторові частоти  $\mu = 1/x$ ,  $\nu = 1/y$ , знайти перетворення Фур'є для функції

$$e(\mu, \nu) = \iint E(x', y') e^{2\pi i(\mu x' + \nu y')} dx' dy' \quad (6)$$

при відомих фур'є-перетвореннях для функцій  $O(x, y)$  та  $D(x' - x, y' - y)$ . Застосувавши перетворення Фур'є до лівої та правої частин (5), отримаємо:

$$e(\mu, \nu) = O(\mu, \nu) M(\mu, \nu). \quad (7)$$

Формула (7) в явному вигляді описує механізм передачі просторових частот оптичною системою: кожному складнику відповідає свій коефіцієнт передачі (у загальному випадку комплексний)  $M(\mu, \nu)$ , який зазвичай і називається оптичною передатною функцією (ОПФ). Функцію  $D(x' - x, y' - y)$ , яка зв'язана з ОПФ двовимірним перетворенням Фур'є, називають функцією розмиття точки. В загальному випадку ОПФ враховує і можливе енергетичне послаблення сигналу (наприклад, за рахунок поглинання) оптичною системою. У випадках, коли потрібна лише залежність ОПФ від просторової частоти, використовується поняття нормованої ОПФ. Остання представляє собою відношення величини ОПФ при заданій частоті до величини ОПФ при нульовій частоті. Завдяки відомим із теорії керування правилам користування передатними функціями, вони стають простим та зручним способом опису утворення зображень.

### ОПТИЧНА ПЕРЕДАТНА ФУНКЦІЯ ОДНОРІДНОЇ АТМОСФЕРИ

Розглянемо однорідну та статичну атмосферу. Така модель атмосфери є досить умовною, але на наступному кроці легко перейти до реальних моделей атмосфери. Основою кількісного опису однорідної атмосфери служить класичне рівняння переносу випромінювання.

У вакуумі інтенсивність постійна вздовж променя. Якщо в середовищі має місце поглинання, розсіяння та випромінювання енергії, то зміна інтенсивності вздовж променя  $I$  описується інтегро-диференціальним рівнянням переносу [3, 11]:

$$\begin{aligned} \frac{dI(\mathbf{R}, \mathbf{n})}{dl} &= -\varepsilon I(\mathbf{R}, \mathbf{n}) + \\ &+ \frac{\sigma}{4\pi} \iint I(\mathbf{R}, \mathbf{n}') x(\mathbf{n}, \mathbf{n}') d\mathbf{n}' + B(\mathbf{R}, \mathbf{n}). \end{aligned} \quad (8)$$

Функція  $B(\mathbf{R}, \mathbf{n})$  характеризує потужність випромінювання одиниці об'єму середовища в одиничний тілесний кут у напрямку  $\mathbf{n}$  і називається функцією джерел. Для повноти задачі рівняння (8) повинно бути доповнено краївими умовами, які формулюються в залежності від геометрії розсіювального середовища й умов освітленості границь.

Реальна атмосфера є розсіювальним середовищем із сильно витягнутою індикаторисою випромінювання. При її освітленні напрямленим джерелом інтенсивність випромінювання має помітні значення лише біля напрямку випромінювання джерела  $\mathbf{n}_0$  та швидко зменшується зі збільшенням  $|\mathbf{n} - \mathbf{n}_0|$ . В цьому випадку має місце так зване рівняння переносу у малокутовому наближенні [8].

Існує декілька типів малокутових рівнянь переносу випромінювання. В одному з них [8, 9] не використовується ніяких додаткових припущень, і інтегральний член рівняння переносу зберігає свій вигляд. Зазвичай такі задачі розв'язуються за допомогою розкладу інтенсивності по поліномах Лежандра, але при сильній анізотропії така методика незручна, оскільки потрібно шукати велике число ненульових коефіцієнтів у цьому розкладі. В цьому випадку краще використовувати другий вид малокутового рівняння переносу, в якому інтегральний член наблизено замінюється інтегралом типу згортки. Як показано в роботі [4], при таких припущеннях рівняння (8) має вигляд

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} + \mathbf{n}_\perp \nabla_r + \varepsilon'(z) \right) I(\mathbf{r}, z, \mathbf{n}_\perp) = \\ & = \frac{\sigma'(z)}{4\pi} \int \int I(\mathbf{r}, z, \mathbf{n}_\perp') x(|\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}_\perp'|, z) d\mathbf{n}_\perp' + B(\mathbf{r}, z, \mathbf{n}_\perp). \end{aligned} \quad (9)$$

Границі умови для рівняння (9) задаються просторово-кутовими характеристиками яскравості джерела:

$$I(\mathbf{r}, z = 0, \mathbf{n}_\perp) = I_0(\mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp). \quad (10)$$

Рівняння (9) із граничною умовою (10) дає повну постановку задачі переносу випромінювання у малокутовому наближенні.

Розв'язуючи поставлену задачу з використанням перетворення Фур'є, приходимо до виразу для ОПФ однорідного шару:

$$\begin{aligned} & M(\nu, z) = \\ & = \exp \left[ - \int_0^z [\varepsilon(z - \xi) - \sigma(z - \xi)x(\nu\xi, z - \xi)] d\xi \right], \end{aligned} \quad (11)$$

якщо ж оптичні характеристики середовища не залежать від глибини  $z$ , то для ОПФ розсіювального шару отримаємо

$$M(\nu, z) = \exp \left[ -\varepsilon z_0 + \sigma \int_0^{z_0} x(\nu\xi) d\xi \right], \quad (12)$$

тут  $z_0$  — товщина всього шару. При  $\nu = 0$  із (12) випливає, що

$$M(\nu = 0) = \exp[-(\varepsilon - \sigma)z_0], \quad (13)$$

тобто ОПФ при  $\nu = 0$  спадає з глибиною тільки через поглинання.

Далі будемо розглядати частотно-контрастну характеристику (ЧКХ) розсіюючого шару, яка рівна нормованій ОПФ, тобто

$$H(\nu) = \frac{M(\nu)}{M(\nu = 0)}. \quad (14)$$

З врахуванням (12) та (13) для ЧКХ матимемо вираз

$$H(\nu) = \exp \left[ -\sigma z_0 + \sigma \int_0^{z_0} x(\nu\xi) d\xi \right]. \quad (15)$$

Перепишемо його в безрозмірних величинах, для чого введемо безрозмірну кутову частоту  $\omega = \nu z_0$  та поняття оптичної товщини однорідного розсіювального шару  $\tau_0 = \xi z_0$ . Тоді

$$H(\omega) = \exp[-\Lambda \tau_0 \varphi_x(\omega)], \quad (16)$$

де

$$\varphi_x(\omega) = 1 - \int_0^1 x(\omega\xi) d\xi, \quad (17)$$

тобто  $\varphi_x$  залежить лише від індикаториси розсіяння.

З виразу (16) видно, що в даному випадку ЧКХ залежить лише від розсіюючої товщини  $\Lambda \tau_0 = \sigma z_0$  та індикаториси розсіяння. По суті, достатньо проаналізувати лише функцію  $\varphi_x(\omega)$ . Для деяких найпростіших випадків функція  $\varphi_x(\omega)$  має нескладний вигляд.

Відмітимо особливу індикаторису

$$x(\beta) = \frac{ae^{-\alpha\beta}}{\beta}, \quad (18)$$

яка непогано описує малокутове наближення при  $a \approx 5...7$ . В цьому випадку вираз для ЧКХ прийме такий вигляд

$$H(\omega) = e^{-\Lambda \tau_0} \left[ \frac{\omega}{a} + \sqrt{1 + (\omega/a)^2} \right]^{\frac{\Lambda \tau_0}{\omega/a}}. \quad (19)$$

Формула (19) широко використовується в різних дослідженнях. Її перевагою є простота та однопараметричність.

Особливістю всіх приведених вище формул для ОПФ та ЧКХ, отриманих у рамках малокутового наближення є те, що значення ОПФ в області малих просторових частот, а значить і при  $\omega = 0$ , є трохи завищеними, оскільки не враховано втрат, пов'язаних з розсіянням в задню півсферу. В той же час ОПФ в області високих частот описується

правильно. Тому при нормуванні (14) та при переході до функції  $H(\omega)$  має місце заниження значень ЧКХ в області високих просторових частот.

### ОПТИЧНА ПЕРЕДАТНА ФУНКЦІЯ ВИПАДКОВОГО НЕОДНОРІДНОГО ШАРУ

Іншою складовою частиною моделі атмосфери є неоднорідний шар. Тут розглядається обмежені плавні й малі флуктуації показника заломлення чистого (без аерозолів) повітря.

Неоднорідності атмосфери знаходяться в постійному турбулентному русі, у зв'язку з чим миттєві характеристики хвильового фронту швидко флуктують у часі. Щоб «заморозити» і тим самим послабити будь-які ефекти з часовим усередненням, необхідно задати досить довгий час експозиції приймача. В основі розрахунку лежить припущення про часову ергодичність, а саме те, що усереднена за великий проміжок часу ОПФ, на яку здійснює вплив велике число незалежних реалізацій атмосферних неоднорідностей, ідентична ОПФ, усередненій по статистичному ансамблю.

За означенням, введеним Дюфф'є [2], ОПФ — це нормована автокореляція комплексної функції зіниці приймача:

$$H(\nu_U, \nu_V) = \frac{\iint P(x, y) P^*(x - \lambda f \nu_U, y - \lambda f \nu_V) dx dy}{\iint |P(x, y)|^2 dx dy}, \quad (20)$$

де  $P(x, y)$  — комплексна функція зіниці,  $f$  — фокусна відстань прийомної системи. Якщо перед прийомною системою знаходиться екран з амплітудним коефіцієнтом пропускання  $t_s(x, y)$ , то функція зіниці стане

$$P'(x, y) = P(x, y) t_s(x, y), \quad (21)$$

а ОПФ матиме вигляд

$$H(\nu_U, \nu_V) = \frac{\iint P(x, y) P^*(x - \lambda f \nu_U, y - \lambda f \nu_V) t_s(x, y) t_s^*(x - \lambda f \nu_U, y - \lambda f \nu_V) dx dy}{\iint |P(x, y)|^2 |t_s(x, y)|^2 dx dy}. \quad (22)$$

Розглянемо тепер нескінченно віддалене монохроматичне точкове джерело, розміщене на оптичній осі системи, що формує зображення. При відсутності атмосферної турбулентності це джерело генерувало б плоску хвиллю, що падала б на прий-

омну систему нормальню до зіниці. При наявності атмосфери плоска хвилля падає на неоднорідне середовище, проходить його та попадає на приймач у вигляді вторинної хвилі з розподілом виду

$$U(x, y) = \sqrt{I_0} \exp[\chi(x, y) + iS(x, y)], \quad (23)$$

де  $I_0$  — інтенсивність падаючої плоскої хвилі, а  $\chi$  та  $S$  — гауссові випадкові змінні.

Використовуючи стандартний імовірнісний аналіз, отримаємо ОПФ для турбулентного шару атмосфери при тривалій експозиції:

$$H(\nu) = H_0(\nu) \exp\left[-\frac{1}{2} D(\lambda f \nu)\right], \quad (24)$$

де  $H_0(\nu)$  — ОПФ приладу.

Тепер розглянемо основні кроки при обчисленні хвильової структурної функції у близькій зоні [2]. Спочатку зробимо ряд значних спрощень, що лише інколи справджаються на практиці. Але потім укажемо, як результати такого спрощеного аналізу можуть бути поширені на ширший круг умов, ніж вважалось спочатку.

Основні спрощення такі.

1. Джерело світла знаходиться на нескінченій відстані від приймальної системи.

2. На деякій скінченій відстані від приймальної системи знаходиться область однорідної та ізотропної турбулентності.

3. Будь-який промінь, що падає на неоднорідне середовище, затримується ним без суттєвого викривлення.

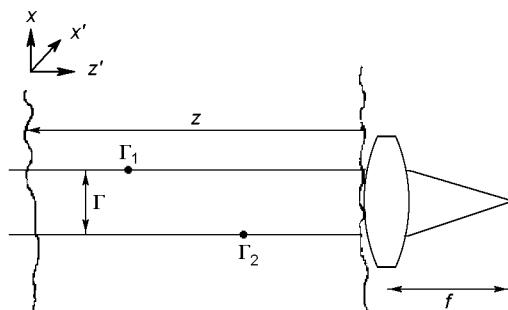


Рис. 1. До задачі обчислення хвильової структурної функції у близькій зоні

На рис. 1 зображена геометрія системи, на якій базується подальше обчислення. Припущення 1 дозволяє нам розглядати тільки точкове джерело на оптичній осі, що створює плоску хвиллю на вході в область турбулентності. Припущення 3 використовується для того, щоб представити фази  $S_1$  та  $S_2$  двох паралельних променів у вигляді

$$\begin{aligned} S_1 &= k \int_0^z [n_0 + n_1(\mathbf{r}_1)] dz', \\ S_2 &= k \int_0^z [n_0 + n_1(\mathbf{r}_2)] dz', \end{aligned} \quad (25)$$

де  $k = 2\pi/\lambda$ .

Крім того, це ж припущення означає, що флуктуація амплітуди знехтувано мала, тобто  $\chi_1 = \chi_2$  та  $D_\chi(r) = 0$ . Користуючись геометричними міркуваннями, отримаємо наступну формулу для фазової структурної функції:

$$\begin{aligned} D_S(r) &= \\ &= 2k^2 \int_0^z (z - \Delta z) \left[ D_n \left( \sqrt{(\Delta z)^2 + r^2} \right) - D_n(\Delta z) \right] d(\Delta z). \end{aligned} \quad (26)$$

Згідно з результатами Колмогорова [12] структурна функція  $D_n$  має вигляд

$$\begin{aligned} D_n(r) &= C_n^2 r^{2/3}, \\ l_0 < r < L_0. \end{aligned} \quad (27)$$

Підстановка її у формулу (26) приводить до виразу

$$\begin{aligned} D_S(r) &= \\ &= 2k^2 C_n^2 \int_0^z (z - \Delta z) \left[ [(\Delta z)^2 + r^2]^{1/3} - (\Delta z)^{2/3} \right] d(\Delta z). \end{aligned} \quad (28)$$

Зауважимо, що, внаслідок обмежень, що містяться у формулі (27), вона може бути застосована тільки при  $\Delta z < L_0$ , де  $L_0$  — зовнішній масштаб турбулентності. Але якщо відстань  $r$  набагато менша за  $L_0$  (зазвичай це так і є, оскільки максимальна відстань, що нас цікавить, рівна діаметру приймальної оптики), то підінтегральний вираз дорівнює нулю при великих  $\Delta z$ , і точна форма структурної функції при  $r > L_0$  стає несуттєвою. Отже, вираз для  $D_S(r)$  можна розглядати як точний для всіх значень довжин шляхів, при яких не порушуються попередні більш суттєві спрощення. Провівши наближене чисельне обчислення попереднього виразу, отримаємо

$$D_S(r) = 2.91k^2 C_n^2 z r^{5/3}. \quad (29)$$

Підставляючи (29) у (24) можна записати вираз для ОПФ атмосфери при тривалій експозиції:

$$\begin{aligned} H(\nu) &= \exp \left[ -\frac{1}{2} 2.91 C_n^2 z (\lambda f \nu)^{5/3} \right] = \\ &= \exp \left[ -57.4 C_n^2 \frac{z f^{5/3}}{\lambda^{1/3}} \nu^{5/3} \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Цей вираз є основним результатом аналізу для області близького поля.

Нагадаємо, що вираз (30) базується на ряді серйозних спрощень, але він справедливий і при більш широких умовах.

По-перше, виявляється, що він справедливий у випадку викривлення променів та дифракції. По-друге, результат можна узагальнити на випадок, коли структурна функція не постійна, а плавно змінюється. Такі зміни важливі при вертикальному спостереженні через атмосферу, коли інтенсивність турбулентності суттєво залежить від висоти над Землею. У цьому випадку формула (30) матиме вигляд

$$H(\nu) = \exp \left[ -57.4 \frac{f^{5/3}}{\lambda^{1/3}} \nu^{5/3} \int_0^z C_n^2(\xi) d\xi \right]. \quad (31)$$

Нарешті, якщо об'єкт розташований на скінченній відстані від оптичної системи, то потрібно розглядати поширення не плоских, а сферичних хвиль. Як було показано Фрідом та Татарським [12], хвильова структурна функція для сферичної хвилі має вигляд

$$D(r) = 2.91k^2 r^{5/3} \int_0^z (\xi/z)^{5/3} C_n^2(\xi) d\xi. \quad (32)$$

Якщо ж структурна стала  $C_n^2$  не залежить від відстані, пройденої вздовж променя, то

$$D(r) = \frac{3}{8} 2.91k^2 C_n^2 z r^{5/3}, \quad (33)$$

що відрізняється від результату для плоскої хвилі лише множником  $3/8$ . Уточнемо, як структурна постійна змінюється вздовж напрямку поширення світла. Для горизонтального поширення світла певної аналітичної залежності не існує, оскільки ці зміни сильно залежать від локального рельєфу та «карти вітрів». При вертикальному ж спостереженні зміни величини  $C_n^2$  ще й залежать від атмосферних умов під час експерименту, але відомі

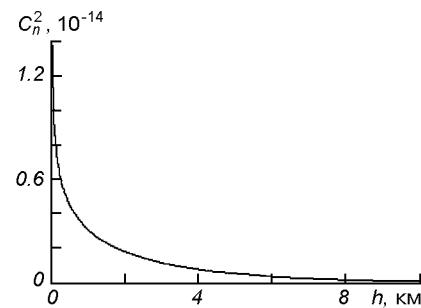


Рис. 2. Залежність структурної сталі  $C_n^2$  від висоти

аналітичні апроксимації для неї. Одна з них така [2]:

$$C_n^2(z) = 4.2 \cdot 10^{-14} z^{-1/3} \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right), \quad (34)$$

де  $z_0 = 3200$  м.

Як видно з рис. 2, інтенсивність турбулентності зменшується із висотою і для  $z > 10$  км нею можна знехтувати.

### ОПТИЧНА МОДЕЛЬ АЕРОЗОЛЬНОГО ШАРУ

Як відомо, важливим фактором в розсіянні світла є аерозолі, тому при побудові моделі потрібно знати реальний розподіл аерозолів в просторі та їхні оптичні характеристики.

Сучасні уявлення про вертикальний розподіл оптичних властивостей аерозолів узагальнені в роботах [1, 6, 7], свідчать про наявність достатньо стійких по висоті інверсій аерозольної концентрації в атмосфері. Експоненціальний закон спадання концентрації аерозольних часток виконується тільки в середньому та до висот 5 км. На інших висотах аерозолі зосереджені переважно в окремих шарах, більш-менш стабільних. Не викликає сумніву наявність аерозольного шару Юнге на висотах 16–22 км. На інших висотах також знаходяться атмосферні шари, але менш стійкі. В роботі [7] на основі узагальнення різних макрофізичних вимірювань аерозолю розроблені оптичні аерозольні моделі для різних довжин хвиль. Перевагою цієї моделі є те, що у своїй основі вона макрофізична і тому дозволяє моделювати практично всі оптичні характеристики аерозолів.

Коефіцієнт розсіяння, очевидно, повинен мати профіль, подібний до профілю коефіцієнта поглинання, бо вони обидва залежать від концентрації та розмірів аерозолів. Тому нам необхідно мати дані про коефіцієнт розсіяння лише в приземному шарі. Згідно з [10] у залежності від погодних умов він досить сильно змінюється, тому для оцінок візьмемо значення  $\sigma_0 = 0.2 \text{ км}^{-1}$ , що відповідає задовільній видимості (при гіршій погоді на космічному фотознімку просто нічого не буде видно). Для перерахунку залежності коефіцієнта розсіяння від висоти користуватимемось наближеною формулою

$$\sigma(H) = \sigma_0 \frac{\varepsilon(H)}{\varepsilon_0}. \quad (35)$$

Для опису розподілу розсіяння на аерозолях по кутах на усіх висотах виберемо індикаторису (18), в якій параметр  $a$  залежить від висоти. Вона добре описує сильну анізотропію та задовільняє малокутове наближення.

Тепер повернемось до молекулярного розсіяння, яке відбувається на всіх висотах атмосфери. Розподіл інтенсивностей розсіяння на молекулах газу описується формулою Релея:

$$x(\beta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \beta).$$

У формулу (15) потрібно підставляти вираз, який отримується з даного за допомогою перетворення Генкеля. Отримано такий результат:

$$\begin{aligned} & \int_0^{z_0} x(\nu\xi) d\xi = \\ & = \frac{3}{4} \int_0^{z_0} \left[ x \int_0^{\infty} (1 + \cos^2 \beta) J_0(\beta \nu \xi) \beta d\beta \right] d\xi = \\ & = \begin{cases} -\frac{3}{16\sqrt{4-(\nu z_0)^2}} & \text{при } 0 < \nu z_0 < 2, \\ 0 & \text{при } \nu z_0 > 2, \end{cases} \end{aligned} \quad (36)$$

тобто молекулярне розсіяння вносить вплив на поширення оптичного сигналу тільки в певному діапазоні просторових частот та висот над Землею.

### РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ОПТИЧНОЇ МОДЕЛІ АТМОСФЕРИ

Розглянемо умовний шар атмосфери, у якого всі оптичні параметри однакові у будь-якій його точці. Цей випадок є близьким до деякого реального нетовстого шару атмосфери, а саме з таких елементів і буде будуватись модель.

У загальному випадку цей шар містить турбулентні вихори. Згідно з відомим фактом ОПФ у такому випадку задається як сума ОПФ турбулентної та ОПФ однорідної складових атмосфери. Врахувавши, що не весь сонячний потік при проходженні даного шару попадає в турбулентні зони, введемо безрозмірний «підгоночний» коефіцієнт  $a$ , тоді результуючий вираз для ОПФ набуде вигляду

$$H = \frac{H_1 + \alpha H_2}{1 + \alpha},$$

де знаменник уведенено для нормування. Враховуючи вирази (12) та (31), отримаємо ОПФ для однорідного реального атмосферного шару:

$$\begin{aligned} H(\nu) = & \frac{1}{1 + a} \left\{ \exp \left[ -\varepsilon z_0 + \sigma \int_0^{z_0} x(\nu\xi) d\xi \right] + \right. \\ & \left. + a \exp \left[ -57.4 \frac{\lambda^{5/3}}{\lambda^{1/3}} \nu^{5/3} \int_0^{z_0} C_n^2(\xi) d\xi \right] \right\}, \end{aligned} \quad (37)$$

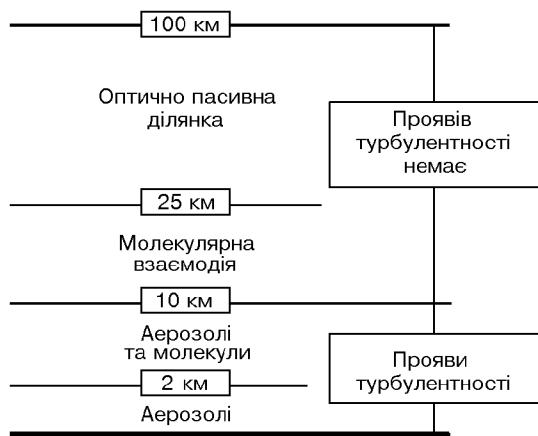


Рис. 3. Модель атмосфери

яка залежить лише від просторових частот  $\nu_x$ ,  $\nu_y$ , параметрів приймальної системи ( $f$ ,  $\lambda$ ) та розсіюваного шару ( $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $x$ ,  $C_n$ ). З цієї формули видно, що при нескінченно малій товщині розсіювального шару ( $z_0 \rightarrow 0$ ) його впливу на поширення світла немає ( $H(\nu) = 1$ ).

На основі сказаного вище можна побудувати 4-шарову модель атмосфери, що охоплює висоти від 0 до 100 км (рис. 3).

Ось основні характеристики кожного із шарів.

**Шар 1** — найнестабільніший в усій атмосфері; в ньому зосереджено найбільше оптично активних елементів. Вклад аерозолів у поширення світла тут значно більший ніж вклад молекул, тому молекулярним поглинанням та розсіянням у цьому шарі занехтувано. З аерозольних моделей [1, 6, 7] простим усередненням можна отримати такі значення параметрів для даного шару:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0.045 \text{ км}^{-1}, \\ \sigma &= 0.013 \text{ км}^{-1}. \end{aligned} \quad (38)$$

Підставивши їх у (37), отримаємо:

$$H_1(\nu) = e^{-0.045 \cdot 2} \left[ \frac{\nu \cdot 2000}{a} + \sqrt{1 + \left( \frac{\nu \cdot 2000}{a} \right)^2} \right]^{0.13 \cdot 10^{-3} a/\nu} \quad (39)$$

— для однорідної частини, і

$$H_2(\nu) = \exp \left( -4.55 \cdot 10^{-10} \frac{f^{5/3}}{\lambda^{1/3}} \nu^{5/3} \right)$$

— для турбулентної.

Звідси добре видно, що турбулентність не вносить ніяких змін в розподіл просторових частот (через дуже малий числовий коефіцієнт у степені експоненти), тому визначальним елементом у цьому шарі є лише однорідна атмосфера.

**Шар 2.** На цій ділянці вклад аерозолів значно менший, ніж у попередньому шарі, тому на розповсюдження світла впливають як аерозолі, так і молекулярна частина атмосфери. Відповідні усереднені коефіцієнти для аерозольної моделі

$$\begin{aligned} \epsilon_A &= 5 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}, \\ \sigma_A &= 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}. \end{aligned} \quad (40)$$

Молекулярна складова атмосфери не вноситиме ніяких значущих збурень, оскільки діапазон допустимих просторових частот на цій ділянці малий (36). Турбулентність буде ще менш впливовою, ніж у попередньому шарі, тому і тут нею занехтуємо.

**Шар 3.** Цей шар також містить у собі аерозольну та молекулярну складові, але розміри аерозолів на цій висоті дозволяють розглядати їхній оптичний вплив еквівалентним молекулярному.

Як видно з оптичної моделі аерозолів [1], коефіцієнти поглинання і розсіяння на три порядки менші, ніж у першому шарі, тому вплив цієї ділянки атмосфери на випромінювання несуттєвий.

**Шар 4.** Ця ділянка вважається цілком прозорою для видимого сонячного випромінювання, тобто вона не вносить ніяких спотворень у сигнал.

Отже, в оптичній моделі залишається лише один однорідний аерозольний шар атмосфери, який справляє помітний вплив на поширення випромінювання (для цього досить порівняти вирази (38) та (40)).

Розглянемо вираз (39) детальніше.

В загальному випадку нас цікавитиме не оптична передатча функція, а частотно-контрастна характеристика (нормована ОПФ). Тоді кінцевим результатом роботи є вираз

$$H(\nu) = e^{-\sigma z_0} \left[ \frac{\nu z_0}{a} + \sqrt{1 + \left( \frac{\nu z_0}{a} \right)^2} \right]^{\sigma a/\nu}. \quad (41)$$

Для вибраних коефіцієнтів (38) та параметра індикаториси  $a = 6$  маємо

$$\begin{aligned} H(\nu) &= \\ &= 0.77 \left[ \frac{\nu \cdot 2000}{6} + \sqrt{1 + \left( \frac{\nu \cdot 2000}{6} \right)^2} \right]^{6 \cdot 0.13 \cdot 10^{-3} / \nu}. \end{aligned}$$

Як видно з рис. 4,  $a$ , в області високих частот модель виходить на певну асимптотику. Дійсно, з виразу (41) випливає, що

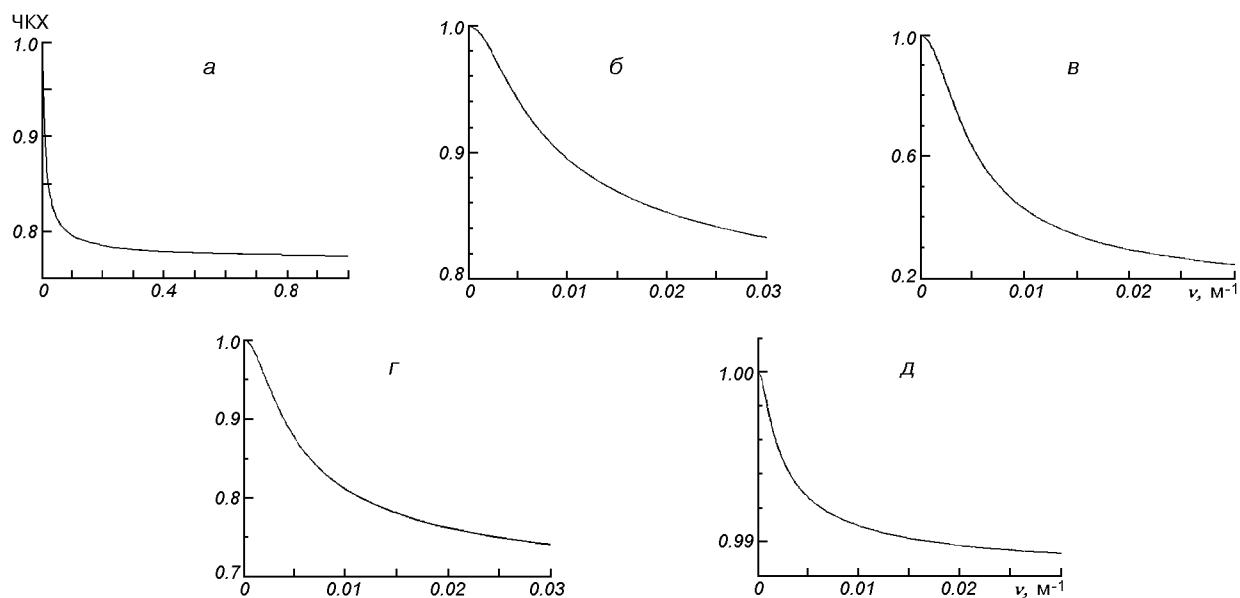


Рис. 4. Графік залежності ЧКХ від частоти: *а* — для  $0 < \nu < 1 \text{ м}^{-1}$ , *б* — для  $0 < \nu < 0.03 \text{ м}^{-1}$ , *в* — при поганій видимості, *г* — при товщині розсіюваного шару 3000 м, *д* — ЧКХ другого модельного шару

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} H(\nu) = e^{-\sigma z_0},$$

але попередні припущення не дозволяють ставитись до отриманих результатів в області високих частот без підозри.

Розглянемо детальніше отриману залежність в області частот  $0 < \nu < 0.03 \text{ м}^{-1}$ , тобто для реальних робочих частот КА «Січ-1М» (рис. 4, б).

Якщо область видимості погана, то  $\sigma_0 = 1.5 \text{ км}^{-1}$ , а відповідний усереднений коефіцієнт розсіяння  $\sigma \approx 1 \text{ км}^{-1}$ . З рис. 4, в видно, що тоді перепад інтенсивностей складає більше 70 %, а реально можна побачити лише об'єкти з розмірами, більшими за 150 м.

Якщо змінити товщину активного шару до 3000 м (рис. 4, г), отримаємо лише незначні зміни, тому змінювати цей параметр вважаємо недоцільним.

При параметрах (40) маємо  $\sigma = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$ ,  $z = 8 \text{ км}$ . Видно (рис. 4, д), що вплив цього шару несуттєвий, адже значення функції змінилось лише на 1 %.

Остаточні підсумки можна сформулювати так.

1. Головний вплив на перенос випромінювання забезпечує приземний аерозольний шар атмосфери.

2. ЧКХ атмосфери описується виразом (41) із невідомими параметрами  $a$  та  $\sigma$ . Значення первого параметра суперечливі та недостовірні, а другий суттєво залежить від умов спостереження.

3. Пошук невідомих параметрів можливий лише при наявності додаткової інформації.

4. При частотах понад  $1 \text{ м}^{-1}$  ЧКХ виходить на асимптотику, хоча ця область потребує детальнішого вивчення.

## ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано фізичну основу передачі випромінювання в земній атмосфері; розглянуто математичну модель основних типів переносу випромінювання; розроблено 4-шарову оптичну модель атмосфери, проаналізовано вклад кожного з шарів у загальний результат; знайдено явний вираз для ЧКХ атмосфери та досліджено його чутливість до зміни параметрів.

Кінцевим кількісним результатом роботи є формула (41) для ЧКХ атмосфери, в якій  $z_0 = \text{const} = 2000 \text{ м}$  та два невідомих параметри  $\sigma$  і  $a$ , що підлягають визначенням. Подальшою метою є застосування отриманої формулі для проведення атмосферної корекції космічних зображень земної поверхні.

- Белан Б. Д. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. — Новосибирск: Сиб. Отд-ние, 1989.—145 с.

- 
2. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988.—528 с.
3. Девидсон Б. Теория переноса нейтронов. — М.: Атомиздат, 1960.—520 с.
4. Зеге Э. П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. — Минск: Наука и техника, 1985.—327 с.
5. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Сов. радио, 1977.—368 с.
6. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.—256 с.
7. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Сиб. Отд-ние, 1982.—196 с.
8. Морс Ф. М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.—864 с.
9. Романова Л. М. Малоугловое приближение решения уравнения переноса и его уточнение // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.—1962.—8, № 8.—С. 1108—1112.
10. Савиных В. П., Кучко А. С. Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. Учебник. — М.: Картогеоцентр—Геоиздат, 1997.—378 с.
11. Соболев В. В. Перенос лучистой энергии в атмосферах планет и звезд. — М.: Гостехиздат, 1956.—391 с.
12. Татарский В. И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. — М.: Изд-во АН СССР, 1959.—232 с.

---

#### MATHEMATICAL MODEL FOR OPTICAL TRANSFER CHARACTERISTICS OF EARTH'S ATMOSPHERE

S. A. Smirnov, R. P. Terletsky

The paper is devoted to the investigation of the propagation of optical radiation and its distortion in Earth's atmosphere. We discuss main types of transformation mechanisms of optical signals connected with molecular, aerosol, and whirlig light scattering, as well as ways of their description and application for modelling the effect of the real atmosphere. The FCC (frequency-contrast characteristics) expression for the atmosphere is derived for further practical application in the atmosphere correction of ERS (Earth Remote Sensing) data. A qualitative analysis of the FCC expression is made.

УДК 629.78

**В. Н. Астапенко, В. И. Иванов, П. П. Хорольский**

Інститут технічної механіки НАН та НКА України, Дніпропетровськ

## Обзор состояния и перспектив спутниковой гиперспектральной съемки

*Надійшла до редакції 07.02.02*

Подано огляд стану, шляхів використання та перспектив розвитку гіперспектральної зйомки з космосу.

Запуски с конца 1990-х гг. узкоспециализированных малых коммерческих КА наблюдения Земли стали возможными благодаря использованию съемочных камер высокого разрешения, созданных с применением новейших военных технологий.

Одной из таких технологий является гиперспектральная съемка, или видеоспектрометрирование, появившаяся в результате эволюционного развития многоспектральной съемки. Путем разделения изображения на сотни каналов формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок (пиксель) характеризуется собственным спектром. Два измерения такого изображения соответствуют пространственному изображению объекта съемки на плоскости, а третье — частоте спектра принятого излучения.

Коротко об истории развития разработок в этой области в СССР. В восьмидесятые годы СССР был близок к созданию гиперспектральной аппаратуры. Так, на КА «Океан-01» № 3, запущенном в 1988 году, был испытан спектрополяриметр «Трассер-HXM». В 1999 г. был запущен украинско-российский КА «Океан-0», на котором установлен поляризационный спектрорадиометр «Трассер-0». Оба прибора были разработаны во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических радиоизмерений Госстандарта СССР и осуществляли съемку вдоль трассы движения спутника, то есть не имели системы пространственной развертки. Основным элементом этих приборов являлся акусто-оптический фильтр, обеспечивающий сканирование

по спектру в 31 канале в диапазоне  $\lambda = 0.4\ldots0.8$  мкм со спектральным разрешением  $\Delta\lambda = 3\ldots12$  нм. При этом обеспечивался выбор одного из двух видов поляризации выходного сигнала. Созданию полноценного видеоспектрометра помешало отсутствие средств и распад СССР [18].

Первым иностранным КА, запущенным на орбиту 23.08.1997 г. с гиперспектральной аппаратурой, был американский спутник «Lewis». Однако спустя четверо суток после запуска из-за отказа бортового служебного комплекса связь с КА прекратилась.

Коммерческий КА «OrbView-4», оснащенный гиперспектральной съемочной аппаратурой BBC США «Warfighter-1», потерян при аварийном запуске 21.09.2001 г.

В начале 2002 г. на орбите успешно функционировали три КА с гиперспектральной аппаратурой: американский КА наблюдения Земли «Earth Observing-1», запущенный 21.11.2000 г., военный экспериментальный КА BBC США «MightySat II.1», выведенный на орбиту 19.07.2000 г., европейский научный КА PROBA, запущенный 22.10.2001 г.

В стадии разработки находится гиперспектральная аппаратура для КА ARIES-1 (Австралия), «SkyMed Cosmo» (Италия), NEMO (США), «Монитор-Э» и «Астрогон» (Россия).

Формирователь гиперспектральных изображений HSI (Hyper Spectral Imager) изготовлен фирмой TRW для КА «Lewis». HSI имел 384 спектральных канала в диапазоне  $\lambda = 0.4\ldots2.5$  мкм, пространственное разрешение 30 м, спектральное —  $\Delta\lambda = 5$  нм, ширину полосы обзора 7.7 км с высоты

523 км. На КА был также установлен линейный эталонный построитель спектрального изображения LEISA (Linear Etalon Imaging Spectral Array) для картирования в полосе обзора шириной 77 км с пространственным разрешением 300 м спектров подстилающей поверхности и характеристик атмосферы, в частности для оценки облачности при съемке HSI [8, 9, 11, 22].

Гиперспектральный построитель изображений с фурье-преобразованием сигнала FTHSI (Fourier Transform Hyperspectral Imager) разработан компанией «Kestrel Corp.» и испытан на борту военного космического аппарата США «MightySat II.1». FTHSI имеет 256 спектральных каналов в диапазоне  $\lambda = 0.45\ldots1.05$  мкм. Спектральное разрешение равно 1.7 нм при длине волны  $\lambda = 450$  нм. Ширина полосы обзора с высоты 547 км составляет 13 км, длина полосы обзора — 20 км. Отношение уровня полезного сигнала к шумовому — 73. Система включает телескоп с тремя зеркалами, создающими изображения в видимом и двух ИК-диапазонах. В качестве регистрирующего устройства используется ПЗС-матрица размером  $1024 \times 1024$  пикселя.

Основная идея, положенная в основу создания FTHSI, состоит в том, что каждый объект характеризуется присущим ему спектром. Однотипные объекты обладают идентичными или очень близкими спектрами. Техническим преимуществом фурье-систем по сравнению с рассеивающими является возможность получения полного спектра без какой-либо задержки во времени, а также разделение пространственных и спектральных характеристик наблюдаемых объектов.

Предполагается, что работа КА «MightySat II.1» синхронизировалась с работой КА оптико-электронной разведки США типа KH-11. Проведение одновременной съемки одних и тех же объектов экспериментальной гиперспектральной камерой и штатной разведывательной аппаратурой позволило выполнить ее тестирование [4, 16, 20, 22].

Камера гиперспектральной съемки «Hyperion» разработана фирмой TRW по заказу геологической службы США USGS (U.S. Geological Survey) и установлена на КА «Earth Observing-1» (EO1), созданном NASA по программе «New Millennium». Камера «Hyperion» обеспечивает получение изображений с пространственным разрешением 30 м в 220 спектральных каналах в пределах  $\lambda = 0.4\ldots2.5$  мкм в полосе шириной 7.5 км и длиной 100 км.

На борту EO-1 установлена аппаратура LAC (Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector) для коррекции изображений, искажаемых поглощением и рассеянием света в атмосфере — главным образом из-за водяного пара. Это гиперспектральный инструмент умеренного

пространственного разрешения. Рабочие диапазоны выбраны в пределах  $\lambda = 0.85\ldots1.5$  мкм, чтобы обеспечивать оптимальную коррекцию снимков с высоким пространственным разрешением. Коррекция данных осуществляется за счет измерения фактических, а не модельных уровней поглощения. Ожидается, что работа LAC позволит повысить точность оценки отражающих свойств поверхности. Такая аппаратура может быть установлена на любом научном или коммерческом аппарате ДЗЗ.

Оценка информативности различных участков спектра осуществлялась при обработке изображений, полученных при одновременной съемке тестовых объектов гиперспектральной и традиционной оптической аппаратурой. КА EO-1 вел съемку совместно с КА «Landsat-7» и «Terra» (EOS AM-1).

После начала военной операции в Афганистане гиперспектральные снимки с КА были использованы армией США для выявления целей и оценки результатов бомбовых ударов. Стоимость архивных гиперспектральных изображений установлена в 500 дол. В случае съемки заказанных объектов стоимость изображения составит 2000 дол. [21, 23, 24].

Компактный спектрометр высокого разрешения CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) установлен на миниспутнике PROBA (Project for On-Board Autonomy), который предназначен для отработки автономного управления научной аппаратурой. КА массой 94 кг разработан бельгийской компанией «Verhaert Design» and «Development» по заказу Европейского космического агентства ESA.

Спектрометр CHRIS разработан и изготовлен британской фирмой «SIRA Electro-Optics» и предназначен для съемки Земли в интересах землепользования, определения биохимических (количество хлорофилла) и биофизических свойств поверхности. Он также используется для изучения распределения аэрозолей в атмосфере и для исследований в области точной атмосферной коррекции данных спутниковой съемки. Наконец, CHRIS позволяет получать гиперспектральные наборы данных по заданным районам при съемке под различными углами зрения.

CHRIS измеряет отражающую способность поверхности под различными углами в 19 спектральных каналах в видимом и ближнем ИК-диапазонах в пределах  $\lambda = 0.45\ldots1.05$  мкм, имея пространственное разрешение 25 м в надире и спектральное разрешение от 2 до 10 нм. Ориентацию прибора на объект съемки под заданными углами зрения обеспечивает спутник. Постановщик эксперимента указывает расположение объекта съемки и время на-

блудений, а бортовой компьютер самостоятельно планирует и отрабатывает программу съемки. Данные сбрасываются на Землю и после дополнительной обработки представляются в виде двунаправленной функции распределения отражения BRDF (Bidirectional Reflectance Function) для выбранных полигонов на земной поверхности [7].

Космический аппарат «OrbView-4», потерянный при аварийном запуске, предназначался для съемки поверхности Земли с высоким разрешением на коммерческой основе. Спутник принадлежал американской компании «Orbital Imaging Corp.» (OrbImage), был разработан и изготовлен фирмой «Orbital Sciences Corp.» (OSC) — одним из совладельцев OrbImage. «OrbView-4» был оснащен панхроматической камерой, позволяющей получать снимки с разрешением 1 м и мультиспектральной камерой, позволяющей получать снимки с разрешением 4 м. Исследовательской лабораторией им. Филиппа BBC США AFRL (Air Force Research Laboratory) в состав КА был включен гиперспектральный прибор с апертурой 0.45 м, 200 и 80 спектральными каналами в диапазонах  $\lambda\lambda = 0.45...2.5$  и  $3...5$  мкм соответственно, пространственным разрешением 8 м и шириной полосы обзора 5 км, разработанный в соответствии с программой «Warfighter-1».

Военное применение гиперспектральных данных заключается в идентификации различных объектов по их уникальным сигнатурам (спектрам). «Warfighter-1» предназначался для проверки ценности таких данных и приобретения необходимого опыта. Для проекта «Warfighter-1» компания OSC разработала мобильную наземную станцию приема [2, 6].

Создание видового спектрометра для получения изображения прибрежных зон океана COIS (Coastal Ocean Imaging Spectrometer) ведется Исследовательской лабораторией ВМС США NRL (Naval Research Laboratory) в рамках программы HRST (Hyperspectral Remote Sensing Technology — гиперспектральная технология дистанционного зондирования). Прибор планируется установить на КА двойного назначения NEMO (Navy Earth Map Observer — аппарат наблюдения и картографирования Земли ВМС) для решения целевых задач как флота, так и коммерческих заказчиков. ВМС будет предоставлен приоритетный доступ в течение 25 % рабочего времени.

Этот аппарат предназначен для обеспечения штабов ВМС информацией о прибрежных зонах, особенностях морского дна и других показателях океанской среды на расстоянии до 50 км от береговой линии (течениях, температуре, характеристиках

волн, планктоне, биолюминесценции, взвешенных примесях, растворенных органических веществах). Предполагается обнаружение мин, подводных лодок и других устройств, создающих угрозы кораблям.

Спектрометр COIS обеспечивает пространственное разрешение 30 и 60 м и спектральное разрешение 10 нм в 200 спектральных каналах в видимом и ближнем ИК-диапазонах в пределах  $\lambda\lambda = 0.4...1.0$  мкм и в коротковолновом ИК-диапазоне в пределах  $\lambda\lambda = 1.0...2.5$  мкм. Величина отношения «сигнал/шум» выбрана на уровне не менее 200 с учетом наблюдения поверхности океана с коэффициентом отражения менее 5 %. Потребляемая мощность спектрометра COIS составляет 90 Вт, скорость передачи данных — 77 Мбит/с, масса — 25 кг, ширина полосы съемки — 40 км. При разрешении  $60\times60$  м COIS сможет снять за один виток полосу общей длиной 8000 км, а в режиме разрешения  $30\times30$  м — девять полос длиной по 200 км.

Разработчиком и изготовителем КА является фирма «Space Systems/Loral», спектрометра — фирма «Science Applications International Corp.». Эксплуатацией системы будет заниматься компания «AlliedSignal Corp.», а фирма «Applied Coherent Technology Corp.» обеспечит обработку полученных со спутника изображений.

Получаемые гиперспектральные данные будут передаваться на станции в Аляске и в Норвегии. Ожидается, что основными сферами коммерческого использования поступающих данных будут разведка полезных ископаемых, экологические исследования, сельское хозяйство и тектонические исследования.

Опубликован перечень военных пользователей системы NEMO, в который входят Военно-морской океанографический центр, Центр боевого обеспечения, Центр воздушной войны ВМФ, Центр подводной войны ВМФ, Центр войны на поверхности ВМФ и Центр систем Командования космических и боевых морских систем.

ВМС вынуждены отложить на неопределенный срок запланированный еще на 2000 г. запуск КА NEMO в связи с тем, что официальный партнер по проекту фирма STDC («Space Technology Development Corp.») не обеспечила необходимое финансирование. Новым партнером стала фирма ESSI («Earth Search Sciences Inc.», МакКолл, штат Айдахо), занимающаяся картографированием ресурсов Земли с самолетов, которая не смогла также получить у инвесторов необходимые финансовые средства в размере 125 млн дол. Пока в активе исполнителя только 6 млн дол. Всего для разработки, развертывания и начала эксплуатации системы

NEMO требуется 250 млн дол. [2, 3, 10, 13, 14, 17, 19].

Видеоспектрометрический блок «Юкон-В» разработан российским научно-производственным предприятием АФАР. Функционально блок входит в состав разрабатываемого комплекса «Юкон—УВИТ», предназначенного для получения информации в УФ-, видимом и тепловом диапазонах спектра. Работает на основе акустооптического эффекта в видимом диапазоне  $\lambda\lambda = 0.5...0.8$  мкм. Общее число каналов 256, из них программно выбирается от 10 до 100 каналов шириной от 4 до 8 нм. Пространственное разрешение при высоте орбиты 400 км составит 20 м, размер кадра на местности — 15×12 км, объем одного изображения — 45 Мбит. Масса блока — 1.5 кг.

Блок «Юкон-В» может быть установлен на служебном модуле российского сегмента МКС, на малых КА наблюдения Земли «Монитор-Э» разработки ГКНПЦ им. Хруничева или на КА «Кондор-Э» разработки НПО машиностроения [5].

Научно-техническим центром «Реагент» разработана гиперспектральная видеокамера, которая обеспечивает съемку местности в 700 спектральных каналах (возможно увеличение до 1000 каналов) с пространственным разрешением 5 м. Реализована возможность аддитивного управления информационными ресурсами камеры по спектральным и пространственным координатам. Программный комплекс системы управления обеспечивает выбор спектрального разрешения от 0.5 до 100 нм в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda = 0.2...0.9$  мкм и 1.0...1.4 мкм, а также одного из двух видов поляризации сигналов. Для пространственно-частотного преобразования сигналов используются перестраиваемые акустооптические фильтры и микроканальные детекторы фотонов. Расчетная точность геометрической привязки изображений составляет 5 м. Масса съемочной аппаратуры составляет 4 кг, потребляемая мощность — 15 Вт. Система управления камеры позволяет осуществлять инструментальную и виртуальную стереосъемку.

Эта видеокамера предназначена для установки на миниспутнике «Астрогон», который разрабатывается НИИ электромеханики (г. Истра, Россия) по программе аэрокосмического мониторинга ОАО «Газпром».

Для отработки технологии гиперспектральной съемки создана авиационная камера, которая обеспечивает пространственное разрешение 12 м с высоты 1 км [5].

Разрабатываемый австралийский КА ARIES-1 (Australian Resources Information and Environment Satellite) предназначен для получения информации

о природных ресурсах и окружающей среде преимущественно для нужд горнодобывающей промышленности. На КА будет использована техника получения гиперспектральных изображений с разрешающей способностью 30 м в полосе обзора шириной 30 км в видимом, а также в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах  $\lambda\lambda = 0.4...2.5$  мкм, охватывающем 96 спектральных каналов.

Программа разрабатывается отделением исследований и разработки полезных ископаемых австралийской государственной научно-промышленной исследовательской организации CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), австралийским центром дистанционного зондирования ACRS (Australian Center for Remote Sensing) и фирмой «Auspace Ltd.» [1, 12, 24].

Выявленные при поиске характеристики гиперспектральной аппаратуры сведены в таблицу. В

#### Основные характеристики гиперспектральной аппаратуры

Аппаратура	$\lambda\lambda$ , мкм	Количество каналов	Пространствен- ное разре- шение, м	$\Delta\lambda$ , нм	Полоса обзора, км
HSI	0.4—2.5	384	30	5.0	7.7
FTHSI	0.45—1.05	256		1.7	13
«Hyperion»	0.4—2.5	220	30		7.5
CHRIS	0.45—1.05	19	25	2—10	
«War- fighter-1»	0.45—2.5; 3.0—5.0	200; 80	8		5
COIS	0.4—1.0	200	30, 60	10	40
«Юкон-В»	0.5—0.8	256	20	4—8	15
«Астрогон»	0.2—0.9; 1.0—1.4	700 (1000)	5	0.5—100	
ARIES-1	0.4—2.5	96	30		30

случае несовпадения значений в разных источниках принятые данные более свежих источников.

При съемке поверхности Земли методами дистанционного зондирования есть проблема коррекции изображений, искажаемых поглощением и рассеянием света в атмосфере.

В СССР и в США существовали различные подходы к решению этой проблемы. В США при определении передаточной функции атмосферы превалировали методы статистической обработки многолетних метеорологических данных для разных районов земного шара в определенные месяцы и недели года. Советские ученые считали, что передаточную функцию атмосферы для учета ее влияния на качество съемки необходимо измерять непосредственно во время съемки спектрометрической аппаратурой.

Так, на советском экспериментальном КА «Оке-

ан-Э», запущенном в 1980 г., был установлен спектрорадиометр 174 К1, который имел 10 каналов в диапазоне  $\lambda\lambda = 11...19$  мкм. С помощью этого прибора можно было восстанавливать профили температуры и влажности атмосферы, а также измерять уровень поглощения солнечного излучения углекислым газом [18].

Судя по тому, что на современных американских спутниках вместе с гиперспектральной аппаратурой устанавливается спектрометрическая аппаратура для измерения параметров атмосферы, похоже, что для гиперспектральной съемки американские исследователи будут применять приборные методы учета влияния атмосферы.

Применение гиперспектральной съемки весьма эффективно при решении большинства хозяйственных и военных задач.

Возможна классификация типов материалов на поверхности Земли в интересах сельского хозяйства, геологии, экологии. Возможно получение данных о составе и структуре покрытой растительностью поверхности. Среди гражданских областей применения можно отметить обнаружение и определение характеристик негативных воздействий на природную среду (химические выбросы, сточные воды и т. п.) либо повреждений сельскохозяйственных угодий в результате стихийных бедствий, нашествия вредителей и др.

Основной областью военного применения технологии гиперспектральной съемки является обнаружение и классификация замаскированных и задымленных целей при проведении войсковых операций или разведки. При разведке секретных объектов можно свести практически на нет проводимые мероприятия по маскировке. При этом не важно, что является предметом маскировки — техника, личный состав, сливы технических отходов производства или специальные сооружения.

Дешифрирование снимков, опознавание и выделение объектов на фоне ложных целей и помех облегчается при создании библиотек (баз данных) специфических спектров разведываемых объектов, поскольку каждый объект характеризуется присущим только ему спектром.

Получение гиперспектральных изображений существенно расширяет номенклатуру и повышает качество услуг в области наблюдения Земли. Однако выдача частным фирмам лицензий на создание коммерческих КА наблюдения с высоким пространственным и спектральным разрешением оговарива-

ется условиями, ограничивающими или блокирующими передачу информации с таких аппаратов недружественным странам в случаях угрозы национальным интересам страны-владельца такого КА.

Руководство американской фирмы «Earth Search Sciences Inc.», специализирующейся в области аэрофотосъемки, считает, что только по программе NEMO можно обеспечить объем продаж гиперспектральных данных, поступающих из космоса, на уровне 1.5 млрд дол. в течение 7—10 лет. Круг возможных клиентов необычайно широк [15].

По оценкам экспертов до 70 % всех задач наблюдения Земли могут быть решены благодаря съемке с высоким спектральным разрешением, и только 30 % — за счет видовой информации с высоким пространственным разрешением [5].

1. АЭРОКОСМОС.—1999.—№ 3.—С. 41—50.
2. АЭРОКОСМОС.—1999.—№ 22.—С. 75—79.
3. Новости космонавтики.—1998.—№ 15.—С. 35.
4. Новости космонавтики.—2000.—№ 9.—С. 42—44.
5. Новости космонавтики.—2001.—№ 7.—С. 44.
6. Новости космонавтики.—2001.—№ 11.—С. 29—31.
7. Новости космонавтики.—2001.—№ 12.—С. 41—44.
8. Ракетная и космическая техника.—1994.—№ 34.—С. 12—14.
9. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 11.—С. 4.
10. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 14.—С. 12—13.
11. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 47.—С. 6.
12. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 51.—С. 89.
13. Ракетная и космическая техника.—1998.—№ 10.—С. 9.
14. Ракетная и космическая техника.—1999.—№ 27.—С. 5.
15. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 15.—С. 13.
16. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 42.—С. 78.
17. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 48.—С. 7.
18. Ракеты-носители и космические аппараты КБ «Южное» / Под ред. С. Н. Конюкова. — Днепропетровск; ООО «Колорграф», ООО РА «ТандемУ», 2001.—240 с.
19. Aviation Week & Space Technology. 12.04.1999.—Р. 70.
20. Aviation Week & Space Technology. 14.08.2000.—Р. 57.
21. Aviation Week & Space Technology. 21.01.2002.—Р. 30.
22. Jane's Space Directory. 1997—1998 / Ed. Ph. Clark-Coulson, Surrey UK: Jane's, 1997.—Р. 183, 428.
23. Space News.—20.11.2000.—Р. 30.
24. Towards an Integrated Global Observing Strategy (1997 CEOS yearbook): Committee on Earth Observation Satellites. — Р. 96, 101, 125.

#### REVIEW OF CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF HYPERSPECTRAL SATELLITE IMAGING

V. M. Astapenko, V. I. Ivanov, P. P. Khorolsky

Review of current status, the ways of use and prospects of hyperspectral satellite space imaging is presented.

УДК 537.591

А. Д. Філоненко

Східноукраїнський національний університет, Луганськ

## Определение прихода с помощью энергии космической лунного и частицы орбитального направления модуля

*Надійшла до редакції 13.02.01*

Знайдено практичний розв'язок задачі про напрямок осі каскадної зливи за допомогою двох навколоісичних модулів і системи трьох взаємно перпендикулярних диполів, встановлених на кожному з них. Цей розв'язок доповнює раніше опубліковані результати дослідження можливості визначення енергії електромагнітного каскаду за радіочастотним компонентом випромінювання  $\delta$ -електронів зливи. Отримані результати можуть відкрити нові можливості для дослідження космічних променів з енергією понад  $10^{21}$  еВ.

Известно, что успехи физики космических лучей очень высокой энергии ( $W_0 > 10^{19}$  эВ) связаны в основном с развитием традиционных методов детектирования. Однако верхняя энергетическая граница этих установок, по-видимому, не поднимется в ближайшем будущем выше  $10^{20}$ — $10^{21}$  эВ. Например, гигантский детектор известного проекта «Пьер Оже» будет иметь суммарную рабочую площадь обоих полушарий  $6000 \text{ км}^2$ . Это соответствует частоте событий 60 частиц в год для диапазона энергий  $W_0 > 10^{20}$  эВ. Имеющиеся на сегодня данные о потоке космических лучей для таких энергий свидетельствуют о незначительном изменении показателя энергетического спектра. С учетом этого факта частота событий для частиц с энергией  $W_0 > 10^{21}$  эВ составит для этой установки всего около одной частицы за год. Для получения надежной информации о космических лучах эту величину следует поднять хотя бы на один порядок. Сохранение прежней частоты регистрации (60 событий в год) для частиц с энергией  $W_0 > 10^{21}$  эВ потребует увеличения площади детектора почти на два порядка. Эти данные свидетельствуют о том, что детектор, основанный на традиционных принципах с площадью около  $10^6 \text{ км}^2$ , в настоящее время построить практически невозможно.

Однако, по нашему мнению, уже сейчас имеется другая возможность увеличить площадь детектора до  $10^7 \text{ км}^2$ . Имеется в виду метод радиодетектирования. Характеристики поля излучения, вызванного  $\delta$ -электронами каскадного ливня в газообразной или конденсированной среде, могут вполне обеспечить его реализацию [1, 2, 4]. Особенно перспективной представляется такая возможность для радиоастрономического метода [7, 8], а также для детектирования частиц высокой энергии с лунной орбиты [3, 6].

В методе радиодетектирования имеется одно существенное обстоятельство. Ни в одной из опубликованных работ по этому направлению вплоть до настоящего момента не было ни единой попытки указать на возможность определения направления прихода космической частицы с помощью антенн радиодетектора. В нашей работе показано, что такая возможность есть. Она особенно легко реализуема, если каскадный ливень распространяется в конденсированной непроводящей электрический ток среде. В этом случае можно не только определить направление прихода частицы, но и с достаточной для практических целей точностью найти ее энергию. Доказательство этих фактов, вместе с ранее опубликованными результатами исследования ме-

ханизма радиоэмиссии  $\delta$ -электронов каскадного ливня в области длин волн  $\lambda > L$  (где  $L$  — продольный размер ливня), ставит на принципиально новую основу метод радиодетектирования космических лучей сверхвысокой энергии ( $W_0 > 10^{21}$  эВ).

Определение направления оси каскадного ливня осуществляется с помощью трех взаимно перпендикулярных вибраторов. Известно, что пространственная диаграмма излучения изолированного вибратора длиной  $2a$  определяется выражением

$$F(\alpha) = \frac{\cos(m\alpha \cos\alpha) - \cos ma}{(1 - \cos ma)\sin\alpha}, \quad (1)$$

где  $m = 2\pi/\lambda$ ,  $\alpha$  — угол между осью диполя и направлением наблюдения  $\mathbf{n}$  [5]. Обычно в качестве простых антенн (и как элементы более сложных) используются полуволновые вибраторы. Однако в реальной конструкции детектора на орбите искусственного спутника Луны [3, 6] применение полуволнового вибратора ( $a = \lambda/4$ ) длиной около  $2a = 5m$  ( $v = 30$  МГц) может вызвать определенные технические трудности. В таких случаях используют укороченные вибраторы, в цепь которых включают последовательно индуктивности для сохранения резонансной частоты. Легко убедиться, что выражение (1) с достаточной точностью можно заменить простейшей функцией  $F_1(\alpha) = \sin\alpha$ . Например, при укорочении полуволнового вибратора в два раза ( $a = \lambda/8$ ) отличие между этими диаграммами не превышает 2 %. Поэтому будем использовать далее нормированную функцию  $F_1(\alpha) = \sin\alpha$  в качестве пространственной диаграммы направленности приемной антенны детектора. Как будет видно далее, это требование не является принципиальным. Кроме этого, согласно [1, 2, 4] будем учитывать, что пространственная диаграмма излучения ливня в диапазоне длин волн  $\lambda > L$  приблизительно выражается также с помощью функции  $F_1(\alpha)$ , т. е. напряженность поля излучения в произвольной точке равна  $E = E_0 \sin\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением излучения  $\mathbf{n}$  и осью каскада. Кроме этого известно, что вектор напряженности  $\mathbf{E}$  лежит в плоскости, составленной осью ливня (или диполя) и направлением наблюдения. В дальней зоне вектор  $\mathbf{E}$  всегда перпендикулярен к  $\mathbf{n}$ .

Для определения направления оси каскадного ливня, а следовательно и направления прибытия космической частицы, на орбите Луны должны находиться два модуля, каждый из которых должен иметь три одинаковых взаимно перпендикулярных вибратора, усилители сигналов и измерители амплитуды э.д.с., наводимых в каждой антенне, а также комплекс приборов для определения положе-

ние модуля относительно системы координат, связанной с Луной. Модули должны находиться на расстоянии прямой видимости, и для уменьшения ошибки измерений быть не слишком близко один от другого. Например, если радиус орбиты модуля порядка  $2R_m$ , то расстояние между модулями может составлять  $(0.5 \div 1)R_m$ .

Каскадный ливень в грунте Луны, вызванный прохождением заряженной частицы сверхвысокой энергии, наведет э.д.с.  $u_{1x}$ ,  $u_{1y}$ ,  $u_{1z}$  и  $u_{2x}$ ,  $u_{2y}$ ,  $u_{2z}$  на клеммах соответствующих антенн первого и второго модулей. Очевидно (см. [5]), она может быть выражена через величину напряженности поля  $E$  и направляющие косинусы углов  $\varphi$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ . Это дает систему из восьми уравнений для определения направляющих косинусов векторов  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  в системе координат каждого из модулей:

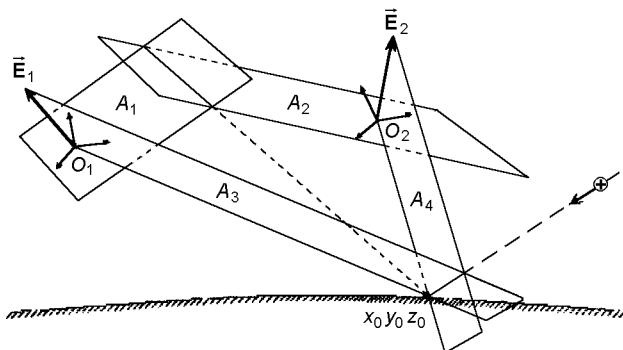
$$\begin{aligned} u_{1x} &= \frac{lE_i}{R_i} \sin\alpha_i \cos\varphi_i, \\ u_{1y} &= \frac{lE_i}{R_i} \sin\alpha_i \cos\xi_i, \\ u_{1z} &= \frac{lE_i}{R_i} \sin\alpha_i \cos\eta_i \\ \cos^2\varphi_i + \cos^2\xi_i + \cos^2\eta_i &= 1, \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $l$  — эффективная длина антенны,  $i$  — номер модуля,  $R_i$  — расстояние от модуля с номером  $i$  до ливня,  $\alpha_i$  — угол между направлением оси ливня и вектором  $\mathbf{R}_i$ .

Рассмотрим прямую, определяемую пересечением плоскостей  $A_1$  и  $A_2$ , проведенных через начало координат каждого модуля. Направляющим вектором для каждой плоскости выберем соответственно  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$ , составляющие которых пропорциональны э.д.с., наводимой в соответствующих антennaх:

$$\begin{aligned} u_{1x}' + u_{1y}' + u_{1z}' &= 0, \\ u_{2x}'' + u_{2y}'' + u_{2z}'' &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Если источник поместить в произвольной точке прямой (3) то направление излучения  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$  на каждый из модулей будет перпендикулярно к  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  соответственно для произвольно выбранных углов  $\alpha$ . Другими словами, каскадный ливень (как точка) для данного набора величин  $u_{1x}$ ,  $u_{1y}$ ,  $u_{1z}$  и  $u_{2x}$ ,  $u_{2y}$ ,  $u_{2z}$  может находиться только на прямой (3). Известно, что каскадный ливень будет всегда находиться на поверхности Луны. Поэтому пересечение (3) со сферой  $x^2 + y^2 + z^2 = R_m^2$ , где  $R_m$  — радиус



Определение положения оси каскадного ливня

Луны, однозначно определяет его координаты  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  (см. рисунок).

Согласно сказанному выше, ось ливня должна лежать одновременно в плоскости векторов  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{R}_2$ ,  $\mathbf{E}_2$ . Чтобы найти ее направление, необходимо провести две плоскости; плоскость  $A_3$  через начало координат  $O_1(x_1, y_1, z_1)$  первого модуля, точку  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  и направление  $\mathbf{E}_1$  и плоскость  $A_4$  через начало координат  $O_2(x_2, y_2, z_2)$  второго модуля, точку  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  и направление  $\mathbf{E}_2$ :

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ E_{1x} & E_{1y} & E_{1z} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{vmatrix} x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ E_{2x} & E_{2y} & E_{2z} \end{vmatrix} = 0.$$

Прямая (4), определяемая пересечением этих плоскостей, и есть направление оси каскадного ливня.

Такая методика расчета направления движения космической частицы позволяет найти количество  $N_0$  электронов в максимуме каскадного ливня (а следовательно, и его энергию). Согласно [1, 2, 4] амплитуда напряженности поля радиоимпульса равна  $E = BN_0\sin\alpha/R$ , где величина  $B$  известна и зависит только от физических констант. Поэтому определение направляющих косинусов из (3), а также отношения  $\sin\alpha/R$  согласно описываемой здесь методике однозначно решает вопрос о количестве  $N_0$  электронов в ливне и о энергии  $W_0$

космической частицы. К схеме определения направления движения космической частицы нужно добавить следующее. Уравнения (2) для  $i = 1, 2$  определяют координаты  $E'_{ix}$ ,  $E'_{iy}$  и  $E'_{iz}$  вектора  $\mathbf{E}_i$  в системе первого ( $i = 1$ ) или второго ( $i = 2$ ) модулей. Для решения уравнений (3), (4) необходимо выразить проекции  $E'_{ix}$ ,  $E'_{iy}$  и  $E'_{iz}$  через соответствующие проекции  $E_{ix}$ ,  $E_{iy}$  и  $E_{iz}$  этих векторов в системе координат, связанной с Луной. Это можно сделать с помощью матрицы преобразований векторов при повороте декартовой системы координат. Ее компоненты в любой момент могут быть получены системой определения ориентации модулей, и эта операция давно решена технически.

1. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Радиоизлучение в диапазоне средних и низких частот, вызванное широким атмосферным ливнем // Письма в ЖТФ.—1994.—20, № 12.—С. 57—61.
2. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Когерентное низкочастотное излучение, вызванное  $\delta$ -электронами широких атмосферных ливней // Укр. физ. журн.—1996.—41, № 7-8.—С. 696—699.
3. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей супервысоких энергий с помощью искусственного спутника Луны // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 4.—С. 87—92.
4. Голубничий П. И., Филоненко А. Д., Яковлев В. И. Низкочастотное радиоизлучение ШАЛ и возможность его использования в методе радиодетектирования // Изв. РАН. Сер. физ.—1994.—58, № 12.—С. 115—118.
5. Пистолькорс А. А. Антенны. — М.: Связьиздат, 1947.—479 с.
6. Филоненко А. Д. Перспективы детектирования космических лучей супервысоких энергий // Письма в ЖТФ.—1997.—23, № 10.—С. 57—62.
7. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей с первоначальной энергией  $10^{22}$ — $10^{23}$  эВ с помощью радиотелескопа // Изв. РАН. Сер. физ.—1997.—61, № 3.—С. 543—546.
8. Филоненко А. Д. Регистрация космических лучей очень высокой энергии декаметровым радиотелескопом УТР-2 // Письма в ЖЭТФ.—1999.—70, № 10.—С. 639—641.

#### DEFINING ENERGY AND DIRECTION OF ARRIVAL OF COSMIC PARTICLE WITH THE HELP OF THE MOON'S SATELLITE

A. D. Filonenko

A practical solution of the problem of direction of the axis of a cascade shower within the Moon's soil with a help of two lunar satellites, each having a crossed antenna, has been found. This solution is a development of already published results of research into possibility of defining energy of electromagnetic shower by radio-frequency emission of  $\delta$ -electrons of the shower.

УДК: 613.15:612.014.464-616.71-007.234

## И. Г. Литовка

Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Київ

# Дозированная гипоксия как фактор коррекции остеопении бездействия

*Надійшла до редакції 25.06.02*

Вивчались особливості впливу нормобаричної газової суміші зі зниженням парціальним тиском кисню на біохімічні показники стану кісткової тканини щурів різного віку з розвантаженням задніх кінцівок. Газова суміш зі зниженням  $P_{O_2}$ , яку подавали у переривчастому режимі, активує ремоделювання кісткової тканини щурів і гальмує розвиток деструктивних процесів у більшій мірі у молодих тварин порівняно з дорослими.

## ВВЕДЕНИЕ

Установлено, что потеря костной массы и снижение прочности костей скелета в условиях хронической гипокинезии или невесомости носят адаптивный характер, и следовательно, наиболее перспективными методами профилактики этих изменений являются методы адаптационной медицины, связанные с использованием слабых стрессогенных факторов [1, 18].

Опубликованные ранее работы [2—4] и данные других исследователей [13, 16, 18, 20, 21] свидетельствуют о том, что одним из способов влияния на интенсивность общего метаболизма может быть применение дозированных гипоксических воздействий. В ряде работ [11, 24] применялась гипобарическая гипоксия, которая отчетливо стимулирует кроветворение и метаболизм, однако сопровождается и отрицательными последствиями гипобарии. В наших исследованиях использована дозированная нормобарическая гипоксия, исключающая возможность побочных эффектов.

Целью работы является изучение воздействия моделированной микрогравитации и способов коррекции возникающих при этом изменений состояния костной ткани у крыс различного возраста.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

В двух сериях экспериментов исследовано 96 крыс-самцов линии Вистар с массой тела  $140 \pm 10$  г и  $300 \pm 10$  г. Возраст, соответствующий такой массе тела, составляет 3 и 6 мес. Каждая серия экспериментов состояла из трех групп: I — виварный контроль, II — крысы с безопорным положением задних конечностей в атмосфере воздуха, III — крысы с безопорным положением задних конечностей и воздействием нормобарической газовой среды. Безопорное положение задних конечностей у крыс (рис. 1) второй и третьей групп создавали вывешиванием тазового пояса по методу Морей — Холтон [22]. Парциальное давление кислорода в использованной нами газовой смеси составляло  $120 \pm 10$  мм рт. ст., что соответствует высоте  $3000 \pm 500$  м над уровнем моря. Подачу газовой смеси осуществляли автоматически в прерывистом режиме: 30 мин — подача газовой смеси, 20 мин — подача атмосферного воздуха. Газовую смесь подавали от мембранных генераторов горного воздуха типа «Борей» на протяжении 8 часов ежедневно в течение 28 суток. Стандартный корм и воду все группы животных получали без ограничений.

Для исследования процессов ремоделирования



Рис. 1. Устройство для моделирования безопорного положения задних конечностей белых крыс

костной ткани определяли биохимические маркеры активности остеобластов, формирующих новую ткань и остеокластов, осуществляющих их резорбцию. Для этого измеряли в костной ткани и сыворотке крови активность щелочной фосфатазы (ЩФ, К.Ф. 3.1.3.1), общую каталитическую активность кислой фосфатазы (КФ, К.Ф. 3.1.3.2) и тартратрезистентной кислой фосфатазы с помощью стандартных наборов «Лахема» (Брюно, Чехия). Обмен протеогликанов оценивали определяя концентрацию гликозаминогликанов (ГАГ) по методу Кляцкина [14]. Статистическую обработку данных проводили с использованием *t*-критерия Стьюдента.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что после 28-суточной разгрузки задних конечностей как у взрослых, так и у молодых крыс с безопорным положением задних конечностей существенно нарушается метаболизм гликозаминогликан-

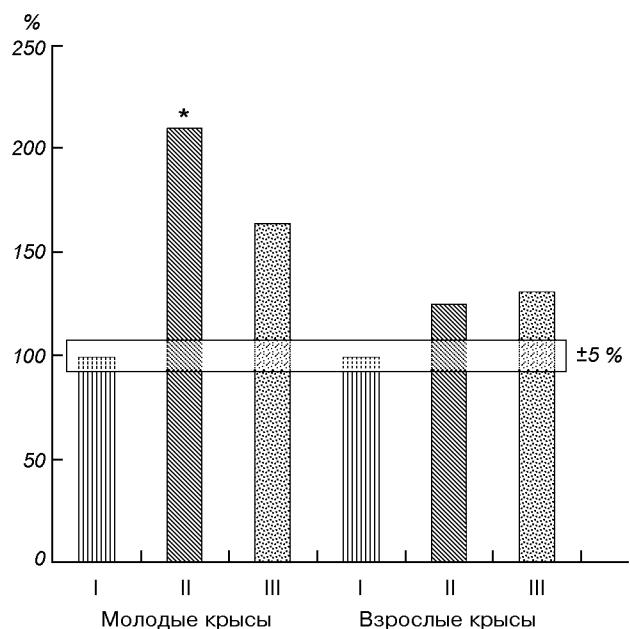


Рис. 2. Концентрация ГАГ в сыворотке крови молодых и взрослых крыс

нов (ГАГ). В сыворотке крови и моче молодых крыс концентрация ГАГ повысилась в 2.1 раза. У взрослых животных с безопорным положением задних конечностей повышение концентрации ГАГ было не столь значительным, однако превышало уровень контрольных животных (рис. 2).

В структуре костной ткани, как известно, основную осевую нагрузку несут кристаллы гидроксиапатита, расположенные в сети коллагеновых волокон. Структура этой сети определяется не только состоянием волокон, но и количеством и качеством поперечных сшивок между отдельными волокнами. Именно эту функцию выполняют ГАГ. Они участвуют в биосинтезе внутрикостного коллагена, обеспечивают упорядоченность и прочность боковых соединений коллагеновых фибрill [19]. Кроме того, именно они ориентируют архитектонику пучков волокон в соответствии с направлением основных векторов биомеханической нагрузки. Более низкая ответная реакция ГАГ на моделирование микрогравитации у взрослых животных свидетельствует о том, что их костная ткань в большей степени сохраняет стабильность своей структуры, чем у молодых крыс.

Как показали наши предыдущие исследования [5—8], моделирование микрогравитации в наземных условиях не менее существенно, чем в условиях реального космического полета, изменяет биомеханические свойства костной ткани. Снижается ее минеральная насыщенность, степень минерализа-

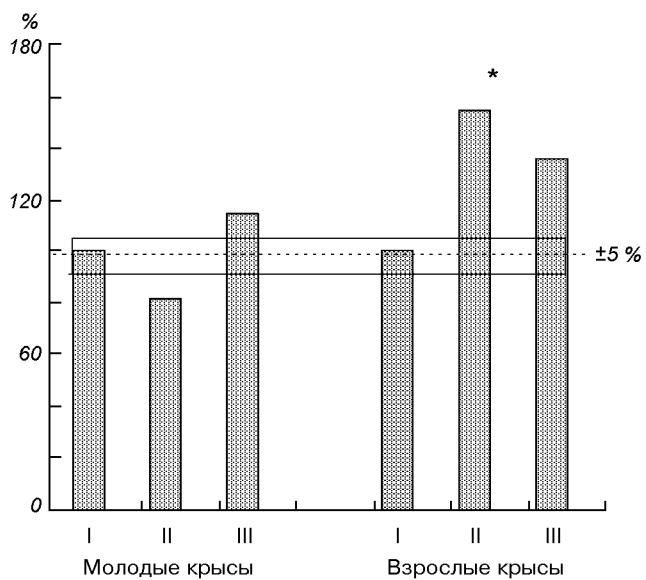


Рис. 3. Активность кислой фосфатазы в сыворотке крови молодых и взрослых крыс

ции, плотность структурной композиции. Достоверно уменьшается несущая способность бедренной кости на 37 %, снижается предел прочности на 31 %, модуль упругости на 53 % и энергия упругой деформации на 43 %. Все эти показатели связаны между собой структурной и функциональной зависимостью, определяющей прочность костной ткани.

У взрослых животных после 28-суточной разгрузки задних конечностей существенно изменялась активность кислой фосфатазы (рис. 3). В сыворотке крови этих крыс активность кислой фосфатазы увеличивалась в 1.5 раза по сравнению с группой контрольных животных. В отличие от взрослых животных в сыворотке крови молодых крыс достоверных изменений кислой фосфатазы не выявлено. Активность тартратрезистентной кислой фосфатазы в сыворотке крови ни у молодых, ни у взрослых крыс не изменялась.

Как показали проведенные нами исследования, достоверных изменений активности щелочной фосфатазы в сыворотке крови и костной ткани у молодых и взрослых крыс не происходило (рис. 4). Это можно рассматривать как показатель относительной стабильности процессов новообразования костной ткани в условиях моделированной микрогравитации.

Известно, что в физиологических условиях жизнедеятельность костной ткани определяется двумя сбалансированными процессами — остеогенезом и

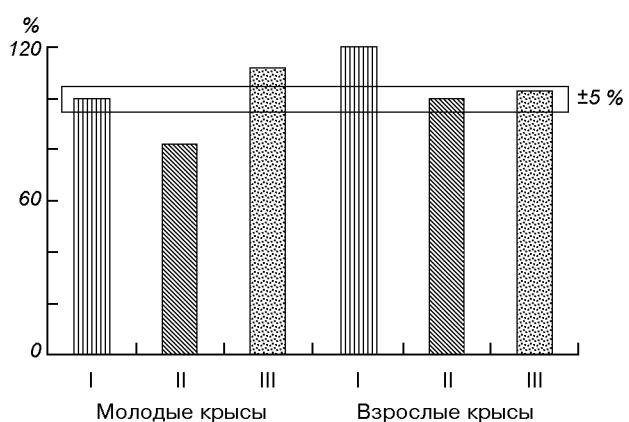


Рис. 4. Активность щелочной фосфатазы в сыворотке крови молодых и взрослых крыс

остеодеструкцией. Первый осуществляется остеобластами. Основным биохимическим маркером которых является щелочная фосфатаза. Второй процесс заключается в том, что остеокласты непрерывно разрушают нефункционирующие или устаревшие элементы костной ткани. Биохимическим маркером интенсивности деятельности остеокластов является активность кислой фосфатазы. Основную роль в поддержании баланса остеогенеза и остеодеструкции играют биомеханические стимулы, возникающие при движениях животного. Генерируемые клетками костной ткани биоэлектрические потенциалы являются обязательным компонентом активности метаболизма этой ткани. Отсутствие или резкое снижение амплитуды биомеханических стимулов в условиях микрогравитации нарушает естественный баланс между новообразованием и разрушением костной ткани, с преобладанием процессов резорбции.

В модельных экспериментах лишение взрослых крыс механической опоры задних конечностей приводит к установлению нового баланса между остеогенезом и остеодеструкцией. Повышение активности кислой фосфатазы в сыворотке крови этих животных можно рассматривать как свидетельство преобладания процессов остеодеструкции. Аналогичные изменения отмечены в сыворотке крови старых животных, для которых типично развитие состояния, сходного с развитием возрастного остеопороза человека.

У молодых крыс с сочетанным действием безопорного положения задних конечностей и активирующей газовой смеси все исследованные биохимические показатели практически не отличались от виварного контроля. Это позволяет нам сделать вывод о том, что газовая смесь нормализовала

соотношение процессов остеогенеза и остеодеструкции у молодых животных, несмотря на разгрузку задних конечностей. Взрослые крысы в аналогичных условиях сочетанного действия двух факторов в меньшей степени реагировали на стимулирующее действие газовой смеси. В этой группе животных отмечена лишь тенденция к снижению активности кислой фосфатазы, что можно рассматривать как признак некоторого торможения активности остеокластов. Вместе с тем у взрослых животных концентрация ГАГ после воздействия газовой смеси оставалась повышенной, что можно отнести за счет возрастного снижения интенсивности метаболизма по сравнению с молодыми крысами.

Полученные результаты хорошо согласуются с представлениями об активирующих возможностях дозированного снижения парциального давления кислорода. Процессы адаптивной активации происходят во всех тканях организма, в том числе в костном мозге и костной ткани пропорционально интенсивности их аэробного метаболизма. Анализ полученных нами данных позволяет говорить о том, что активность биохимических реакций и скорость перестройки костной ткани у крыс отражает общую закономерность активации метаболических процессов в организме при воздействии активирующей гипоксии. Интенсивность этого процесса зависит от парциального давления кислорода во вдыхаемой смеси, общей продолжительности гипоксических экспозиций, длительности и числа периодов гипоксической респирации, соотношения длительности дыхания гипоксической смесью и атмосферным воздухом [9, 10], степени гипокинезии и ее длительности. Как показали наши исследования, одним из факторов, определяющих реакцию организма, является возраст животного.

Использование принципа стимуляции метаболизма дозированным снижением парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе открывает возможность широкого варьирования амплитуды и длительности гипоксического стимула, соотношения длительности стимулов и пауз нормоксической респирации и общего времени экспозиции. Варьируя этими параметрами, можно достичь различной степени воздействия на процессы остеогенеза и остеодеструкции, нормализовать физиологическое ремоделирование костной ткани в условиях гипокинезии, реальной и моделируемой микрогравитации.

## Выводы

1. В условиях 28-суточного безопорного положения задних конечностей биохимические показатели ко-

стной ткани взрослых крыс ухудшаются в большей степени, чем у молодых животных.

2. У молодых животных с безопорным положением задних конечностей, вдыхавших гипоксическую газовую смесь с пониженным парциальным давлением кислорода, происходит практически полная компенсация негативных последствий дефицита нагрузки.

3. Варьируя параметрами нормокислического гипокислического стимула можно добиться различной степени воздействия на физиологическую резорбцию и ремоделирование костной ткани при дефиците функциональной нагрузки.

1. Аврунин А. С., Корнилов Н. В., Суханов А. В., Емельянов В. Г. Формирование остеопоротических сдвигов в структуре костной ткани. — С-Пб: Ольга, 1988.—68 с.
2. Астахова В. С., Березовский В. Я., Панченко Л. М., Хасабова И. А. Клонування стромальних клітин-попередників кісткового мозку людини за умов зниженого парциального тиску кисню // Фізіол. журн.—2001.—47, № 1 (частина 2).—С. 40—44.
3. Березовский В. А., Дайнега В. Г. Физиологические механизмы саногенных эффектов горного климата. — Киев: Наук. думка, 1988.—222 с.
4. Березовский В. А., Левашов М. И. Физиологические предпосылки и механизмы нормализующего действия нормобарической гипоксии и оротерапии // Физiol. журн. им. И. М. Сеченова.—1992.—38, № 5.—С. 3—12.
5. Березовський В. Я., Літовка І. Г., Чака О. Г. Вплив дозованої гіпоксії на розвиток ситуаційної остеопенії // Фізіол. журн.—2000.—46, № 1.—С. 10—16.
6. Березовський В. Я., Літовка І. Г., Чака О. Г., Лахін П. В. Вплив зниженого  $P_{O_2}$  на модуляцію остеодистрофії у щурів за різних статокінетичних умов // Фізіол. журн.—2001.—47, № 1 (частина 2).—С. 50—54.
7. Березовский В. А., Литовка И. Г., Чака Е. Г. и др. Биофизическая стимуляция остеогенеза // Пробл. остеологии.—1999.—2, № 2.—С. 12—15.
8. Березовский В. А., Литовка И. Г., Чака Е. Г. и др. Влияние дозированной гипоксии на метаболизм костной ткани в условиях осевой разгрузки задних конечностей // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 77—84.
9. Волков Н. И. Современные методы гипоксической тренировки в спорте // 3-й Междунар. конгресс «Теория деятельности и социальная практика», Москва, 26—29 июня 1995 г. — М.: Физкультура, образование, наука, 1995.—С. 27.
10. Волков Н. И., Бровко А. П., Фефилатьев Л. П., Бугаев С. А. Физиологические эффекты прерывистой гипоксии // Российский конгресс по патофизиологии. Патофизиология органов и систем. Типовые патофизиологические процессы (экспериментальные и клинические аспекты). — М.: РГМУ, 1996.—С. 117.
11. Воложин А. И., Лемецкая Т. И. Изменение кальциевого и фосфорного обмена в костях и зубах при кислородном голодании // Патол. физиология и эксперим. мед.—1970.—14, № 5.—С. 16—20.
12. Капланский А. С., Дурнова Г. Н., Сахарова З. Ф., Ильина-Какуева Е. И. Гистоморфологический анализ костей крыс, находившихся на борту биоспутника «Космос-1667» // Космич. биол. и авиакосмич. мед.—1987.—21, № 2.—С. 5—31.
13. Карап Ю. М., Стрелков Р. Б., Чижов А. Я. Нормобариче-

- ская гипоксия в лечении, профилактике и реабилитации. — М., 1988.—351 с.
14. Кляцкин С. А., Лифшиц П. И. Определение гликозаминонликанов орциновым методом в крови больных // Лаб. дело.—1989.—№ 9.—С. 51—53.
15. Коваленко Е. А., Гуровский Н. Н. Гипокинезия. — М.: Медицина, 1980.—320 с.
16. Колчинская А. З. Физическое состояние. Работоспособность. — Киев: Наук. думка, 1991.—208 с.
17. Meerzon Ф. З., Твердохлеб В. П., Боев В. М., Фролов В. А. Адаптация к периодической гипоксии в терапии и профилактике. — М.: Наука, 1989.—228 с.
18. Оганов В. С. Гипокинезия — фактор риска остеопороза // Остеопороз и остеопатии.—1988.—№ 1.—С. 13—17.
19. Оганов В. С., Брик А. Б., Щербина О. И. и др. О влиянии дефицита опорной нагрузки на взаимосвязь «коллаген-кристалл» в костной ткани крыс по данным ЭПР // Матер. XII конф. по космич. биологии и авиакосмич. медицине. — М., 2002.—С. 255—256.
20. Сметанин В. Я. Воздействие различных режимов интервальной гипоксической тренировки на кардиореспираторные и гематологические функции // Физиология человека.—2000.—26, № 4.—С. 73—82.
21. Стрелков Р. Б., Чижов А. Я. Прерывистая нормобарическая гипоксия в профилактике, лечении и реабилитации. — Екатеринбург: Уральский рабочий, 2001.—400 с.
22. Morey-Holton E. R., Wronski T. I. Animal models for simulating weightlessness // Physiologist.—1981.—24, N 6.—P. 45—48.
23. Nishimura Y., Fukuoka H., Kiriyama M., Suzuki Y. Bone turnover and calcium metabolism during 20 days bed rest in young healthy males and females // Acta physiol. Scand.—1994.—150, suppl., N 616.—P. 27—35.
24. Rambaut P. C., Johnson P. S. Prolonged weightlessness and calcium loss in man // Acta astronaut.—1979.—6, N 9.—P. 1113—1122.

---

#### DOSED HYPOXIA CORRECTION EFFECT ON THE WEIGHTLESSNESS OSTEOPENIA

I. G. Litovka

We investigated the influence of a dosed condition regime of breathing the artificial gaz mixture with a lower  $P_{O_2}$  at the normal atmospheric pressure on the biochemical indices of bones after axial unloading of rear extremities of rats of different age. The gaz mixture with a lower oxygen content supplied in the faltering regime activizes the rat bone tissue remodeling and hinders the destructive processes to a greater extent in young animals compared to adult ones.

УДК 629.78; 591.044

П. І. Баранський<sup>1</sup>, Є. Ф. Венгер<sup>1</sup>, О. В. Гайдар<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ,

<sup>2</sup>Інститут фізики НАН України, Київ

Проблеми, пов'язані з довготривалим  
перебуванням космічних кораблів з астронавтами  
на борту в міжпланетному просторі  
(Довготривалі космічні подорожі:  
погляд у майбутнє)

*Надійшла до редакції 15.11.01*

Обговорено проблеми, пов'язані з плануванням і практичною реалізацією довготривалих космічних подорожей в міжпланетному просторі. Аналіз сучасного стану науки і техніки свідчить про те, що: — електромагнітний захист від радіації космічного корабля (КК), призначеного для довготривалих космічних подорожей, його екіпажу, засобів регенерації біомаси і кисню (у формі космічних оранжерей чи мікроорганізмів) і напівпровідникової елементної бази бортових ЕОМ, систем автоматики і радіотелекомуникації можна забезпечити лише за рахунок використання матеріалів майбутнього, які будуть характеризуватися «кімнатнотемпературною» надійністю, високими значеннями критичних магнітних полів, достатньою механічною надійністю і радіаційною стійкістю; — безпечне і прийнятне функціонування членів екіпажу та інших об'єктів живої природи, як і напівпровідникової елементної бази відповідальних технічних вузлів і засобів автоматики чисельних бортових систем, може бути забезпечено лише шляхом створення магнітного оточення на борту КК, наближеного до того, яке існує в земних умовах. Тобто, кабіна КК має бути сама надійно захищеною від впливу сильного магнітного поля (кілька сотень мілітесла), яке одночасно буде захисним щитом для КК від космічної (переважно протонної) радіації.

## ВСТУП

Не торкаючись надзвичайно важливих фізичних, медичних і психо-комунікаційних факторів ДКП, детально розглянутих фахівцями відповідних спеціальностей в монографії [31], проаналізуємо вплив на КК і його екіпаж лише тих змін в оточуючому середовищі, які для них стають на весь час довготривалої космічної подорожі (ДКП) неподмінними і характерними з моменту виходу КК на міжпланетну орбіту. Згадані зміни будуть пов'язані головним чином з трьома факторами: з мікрогравітацією (МГ), або невагомістю, з практичною відсутністю атмосфери і відсутністю геомагнітного поля (ГМП). Аналіз багатого фактичного мате-

ріалу, накопиченого протягом кількох десятиліть освоєння космосу, переконливо показує, що ДКП майбутнього, що триватимуть 3—5 років, будуть практично неможливими без створення наступних життєво важливих умов.

1. Забезпечення відносно комфорного перебування (життя і праці) людини в КК в умовах мікрогравітації. Уже під час 18-добового польоту космонавтів А. Г. Ніколаєва і В. І. Севастьянова на КК «Союз-9» зафіксовано (за даними монографії [31]) зменшення м'язової маси космонавтів, їхню слабкість і астенію, підвищену бальову чутливість, підсилення рефлексів, головокружіння і нестійкість при вертикальному положенні тіла. Це стимулювало зусилля медичного персоналу на розробку ком-

пенсаторних профілактических заходів для відвернення м'язової атрофії, зниження загального тонусу і порушень кровообігу за рахунок цілеспрямованої фізичної підготовки і додаткових м'язових навантажень з чітким режимом фізичних вправ як в попередніх приготуваннях до космічного польоту, так і в умовах мікрогравітації (МГ). Можна стверджувати, що ці зусилля космічної медицини не пройшли марно. За такої профілактики, як показав досвід, прийнятного рівня техніки безпеки перебування людини на навколоzemельних орбітах протягом одного року практично уже досягнуто, і отже, при деяких удосконаленнях фізичної підготовки і медично обґрунтованому фізичному навантаженні космонавтів в умовах МГ триває безпечного перебування людини в космосі, напевне, можна вже зараз суттєво розширити до прийнятного для ДКП.

2. Гарантоване збереження (на вказаний проміжок часу) механічної і радіаційної стійкості КК (конструкційних матеріалів зварних швів, усіх його механічних вузлів і систем автоматики). Накопичений у минулому досвід використання зварних вузлів КК різного призначення і космічної станції «Мир» з відповідальними конструкційними елементами (типу систем багаторазового розкриття і складання сонячних батарей протяжністю 15 м, яка після п'яти років експлуатації в космосі була складена, перенесена в друге місце і повторно розкрита [20]), висока механічна і радіаційна стійкість сучасних конструкційних матеріалів, перевірена протягом багатьох років в жорстких експлуатаційних умовах атомної енергетики і досягнуті успіхи в електронно-променевому електрозварюванні не тільки на Землі, а і в космосі [21, 22] вселяють сподівання на те, що надійність в механічному відношенні і радіаційну стійкість КК, розраховані на ДКП, напевне, можна уже зараз забезпечити на основі сучасного рівня науки і новітніх технологій.

3. Створення ефективних засобів регенерації кисню і біомаси, необхідних для життезабезпечення астронавтів.

4. Забезпечення стійкого і надійного функціонування автономних джерел енергії елементної бази ЕОМ, напівпровідникових вузлів автоматики, систем наддалекого зв'язку і телекомунікації в умовах суттєво підвищеної радіаційної активності міжпланетного простору.

Мета нашої роботи — розглянути ступінь необхідності і рівень технологічних можливостей у забезпеченні третьої і четвертої з вище названих вимог, без виконання яких практична реалізація ДКП безсумнівно виявиться проблематичною.

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕБУВАННЯ КК З ЇХНИМИ ЕКІПАЖАМИ ЗА МЕЖАМИ ЗЕМНОЇ МАГНІТОСФЕРИ

Аналіз руху КК, а також ефективності функціонування живих і неживих систем на його борту з виходом на міжпланетну орбіту необхідно провадити з урахуванням відсутності земного тяжіння і ще двох надзвичайно важливих факторів: земної атмосфери і геомагнітного поля (ГМП) (рис. 1).

Оскільки вихідні (бортові) запаси кисню і біомаси для ДКП не можуть бути достатніми, необхідно створити і практично освоїти системи регенерації біомаси і кисню, щоб саме вони складали основу автономного життезабезпечення астронавтів.

Однаке, якщо методика відтворення кисню і біомаси і буде запропонована, то у зв'язку з досить значною тривалістю міжпланетних подорожей, а також відсутністю атмосфери і ГМП — на передній план випливе абсолютна необхідність заміни їхніх захисних функцій шляхом створення відповідних екранів, які могли б захищати «живі» системи регенерації біомаси (і кисню), самих астронавтів і досить уразливу (по відношенню до частинок високих енергій в спектрі первинних і вторинних космічних променів) напівпровідникову елементну базу ЕОМ, напівпровідникові засоби автоматики і наддалекого зв'язку і навіть автономні джерела електроенергії, якщо мова йде про тривалість мандрівок у декілька років. Адже склополімерні захисні засоби сонячних батарей, які зараз використовує космічна техніка, без відповідної модифікації теж можуть виявитися недостатніми.

Відомо, що Сонце щосекунди розсіює у простір 4 млн тонн своєї маси у вигляді електромагнітних випромінювань широкого діапазону, а також елек-

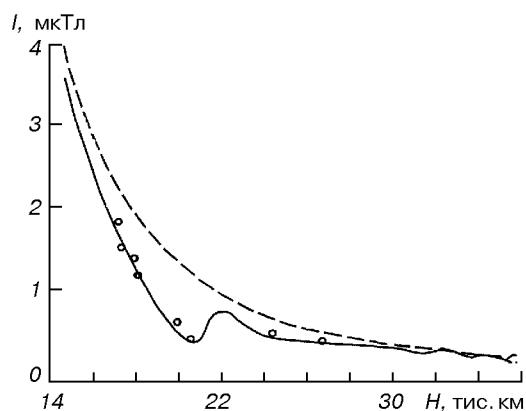


Рис. 1. Крива зміни напруженості магнітного поля Землі з висотою. Штрихова крива — модельні значення, суцільна крива — дані вимірювань [24]

трично заряджених і нейтральних частинок. До Землі доходить мала часточка цього енергетичного потоку. Але і вона була б згубною для всього живого на нашій планеті, якби не захисна дія двох постійно діючих факторів: товщі атмосфери і ГМП.

Саме атмосфера Землі масою  $5 \cdot 10^{15}$  тонн ефективно поглинає або відбиває значну частину смертоносного потоку, а невелике магнітне поле (50—60 мкТл в середніх широтах), що пронизує всю товщу атмосфери, «закручує» і відхиляє від попадання на поверхню Землі потоки сонячних протонів і  $\alpha$ -частинок відносно невеликої густини ( $1—2 \text{ см}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), але надзвичайно великих (біля світлових) швидкостей [15].

Широкомасштабні дослідження останніх десятиліть показали, що в питаннях, пов'язаних з різними формами життя на нашій планеті, ГМП слід розглядати не тільки як фактор захисту життя на Землі від згубного впливу космічної радіації, а також як один із ефективних екологічно важливих факторів [7, 13, 16, 26, 28, 33].

На відстані 60—100 тис км від Землі геомагнітне поле надзвичайно мале і складає лише 2—3 нТл, або приблизно в 20 тисяч разів менше, ніж на середніх широтах [24]. Тому думка Д. Бейшера [36] про те, що «наявність ГМП під час всієї еволюції рослинного і тваринного світу на Землі призвела до того, що жоден живий організм не може бути вилученим з магнітного середовища без серйозних негативних наслідків» — спонукає на глибокі роздуми про рівень і гарантії безпечної перебування астронавтів в надслабкому магнітному полі (НМП) протягом кількох років. На користь такої думки свідчать результати досліджень [34]. Майбутні космонавти розміщувались на 10 діб в кімнаті з залишковим магнітним полем 0.001 мкТл (замість звичайного 50 мкТл). Суб'єктивне відчуття суцільності світлового потоку в них наступало при суттєво нижчих значеннях частоти модуляції світла, ніж в умовах нескомпенсованого ГМП (яке слугувало для цих дослідів контролем). І хоча в обговорюваних дослідах зміни органів зору людей були обворотними, не можна бути байдужим до застереження, висловленого в роботі [40], а саме: «В то время как помещение подопытных мышей в гипомагнитное (надслабкое — прим. наша) поле не оказывает никакого видимого воздействия, если опыт длится не более недели, тот же эксперимент приводит к тяжелым расстройствам обмена веществ, становясь причиной преждевременной смерти, когда он продолжается от четырех месяцев до одного года. В этих условиях можно задать себе вопрос относительно результатов, которые были бы получены, если бы опыты на людях, проведенные Бейшером, имели аналогичную продолжительность...»

С другої сторони, известно, що на протяжении тысячелетий магнитное поле неоднократно изменяло свою полярность; последнее изменение произошло 700000 лет назад. Можно утверждать, что с того времени ГМП в течение тысячи лет было равно нулю. Путем изучения ископаемых в осадочных слоях геофизикам удалось доказать, что многие виды радиолярий вымерли именно в этот период и связать это явление с отсутствием ГМП. Это утверждение, впрочем, было подтверждено существованием других изменений фауны и флоры в эту эпоху».

Штучно дуже ослаблене ГМП (введене шляхом екранивування чи компенсації до значень 0.01—0.1 мкТл) негативно впливає на ріст і розвиток як рослин [16, 28] (див. рис. 2 і табл. 1), так і мікроорганізмів [27].

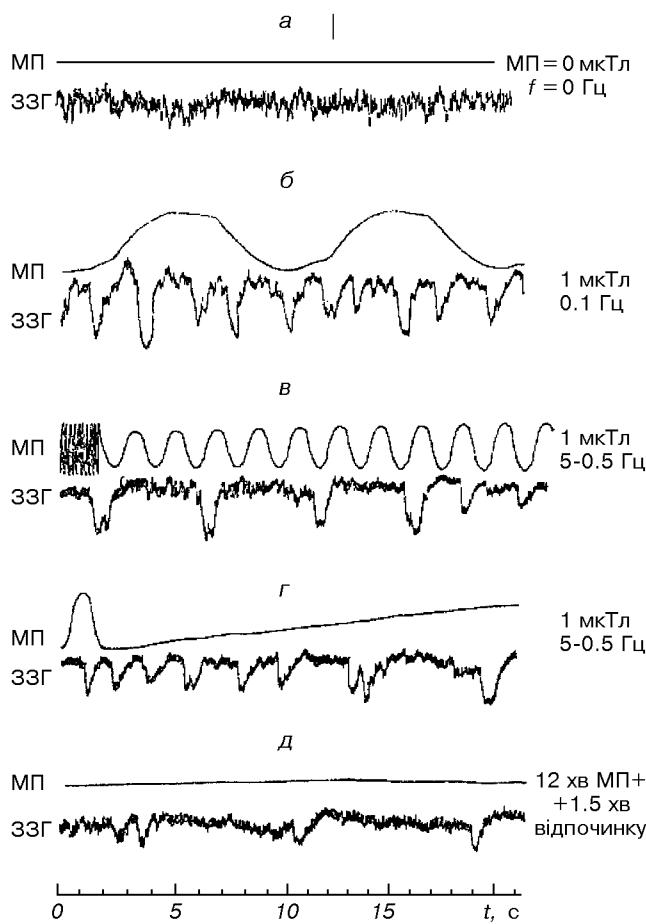
Приведені вище факти, а також обґрунтовані вказівки на те, що ритміка фізіологічних процесів у рослин виявляє чітку кореляцію зі змінами елементів ГМП у часі [11, 12], свідчать про те, що ГМП є екологічно важливим фактором. Без його відтворення на борту космічного корабля напевне не зможуть надійно і стійко функціонувати не тільки життєво важливі системи людського організму (центральна нервова, серцево-судинна та ін.), але також і життєво необхідна регенерація біомаси. Тому без штучного «аналога» ГМП на космічному кораблі довготривала подорож взагалі може виявитися нездійсненою, або недієздатною. У той же час поле, еквівалентне ГМП, навіть в досить значному об'ємі кабіни КК відносно легко можна відтворити за допомогою кілець Гельмголь-



Рис. 2. Коренева система тритижневих рослин ячменю: а — вирощених в ГМП; б — вирощених в МП 0.01 мкТл [16]

Таблиця 1. Вплив надслабкого МП ( $\approx 0.01$  мкТл) на ріст ячменю (сорт — Носовський) [16]

Варіант	Надземна маса				Корені				Кількість рослин, що мають третій листочек, %	
	Сира вага		Суха вага		Сира вага		Суха вага			
	Однієї рослини, мг	%								
ГМП	555.0	128.0	46.4	126.5	93.0	139.0	8.22	141.5	58.7	
НМП	433.0	100.0	36.7	100.0	67.0	100.0	5.78	100.0	39.4	
ГМП	465.5	112.5	35.7	119.5	49.9	135.1	7.2	148.5	87.0	
НМП	414.0	100.0	29.8	100.0	36.9	100.0	4.8	100.0	50.0	

Рис. 3. 20-секундні відрізки електроенцефалограми (ЕЕГ) пацієнта Л.Г.: а — до включення МП; б — між 60 і 80 с дії МП  $\Delta Z_1$  1 мкТл і частотою  $f_4 = 0.1$  Гц; в — між 200 і 240 с дії МП  $\Delta Z_1$  при переході від  $f_8 = 5$  Гц до  $f_9 = 0.5$  Гц; г — між 250 і 270 с дії МП  $\Delta Z_1$  при переході від  $f_9$  до  $f_3 = 0.01$  Гц; д — після 12 хв дії МП і 1.5 хв відпочинку [18]

ця, які достатньо буде живити відносно малим постійним струмом.

З іншого боку, не можна не враховувати наявності великої щільноти електронної «начинки» КК (всі системи автоматики, засоби зв'язку і телеба-

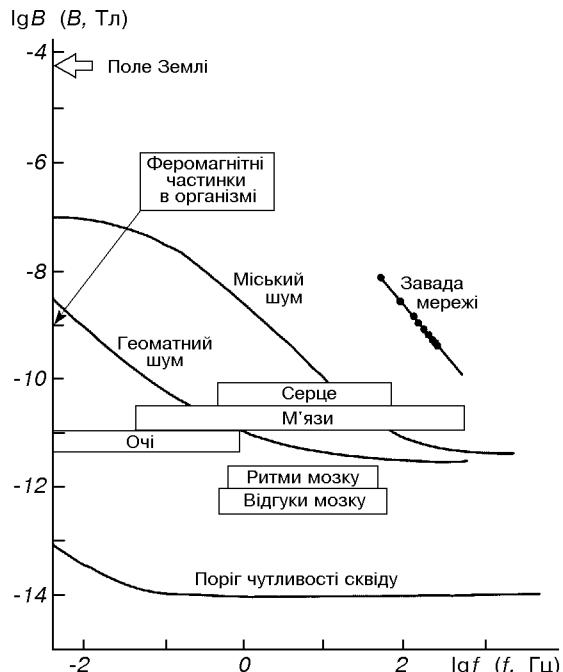


Рис. 4. Місце біомагнітних сигналів організму людини в шкалі магнітних полів. Показані характерні рівні перешкод (завад) і частотні діапазони сигналів [6]

чення, науковий інструментарій і, можливо, деякі системи життезабезпечення астронавтів), в електрических колах яких циркулюють змінні струми різної сили і частоти. Саме ці струми будуть заповнювати об'єм КК розсіяними змінними магнітними полями, якщо не буде передбачено відповідного магнітного екраниування.

Про необхідність такого екраниування свідчить також надзвичайно висока чутливість ЦНС та інших життєво важливих систем людського організму до змінних магнітних полів низької напруженості і частоти. Про це можна судити із кардинальних змін вигляду електроенцефалограм під впливом змінного магнітного поля, у 50 разів слабших від ГМП (див. рис. 3) [18]. Магнітне екраниування малогабаритних напівпровідникових електронних

систем феромагнітними екранами (і отже, ліквідація чи суттєве зниження шкідливого впливу на астронавтів магнітних полів розсіяння) має бути реалізованим. Адже ці змінні магнітні поля розсіяння можуть навіть безпосередньо взаємодіяти з власними магнітними полями різних органів людини, що добре видно з рис. 4. Ці ж магнітні екрани будуть заодно захищати напівпровідникову електроніку від шкідливого впливу на неї радіаційних космічних потоків.

При всьому цьому основні функції захисту КК, астронавтів, елементної бази ЕОМ і систем автоматики, «живого виробництва» (чи засобів регенерації біомаси) має на себе повністю взяти деякий «еквівалент» атмосфери, надійний щит, про який йтиметься нижче.

#### **ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З ПОДОЛАННЯМ ЗГУБНОГО ВПЛИВУ КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ЕКІПАЖ І ЗАСОБИ З ВІДНОВЛЕННЯ БІОМАСИ В УМОВАХ ДКП**

Обговорюючи результати досліджень біологічних процесів, що проходять в мікроорганізмах в умовах космічного польоту, автори монографії [28] звертають увагу на неадекватність (і навіть некоректність) трактовки результатів, яка ґрунтується на врахуванні впливу на них лише невагомості (МГ) та ігноруванні менш ймовірних відомих факторів (змінене МП, неоднорідність космічного випромінювання, радикальна зміна біоритміки та ін.). Якщо для навколоzemних орбіт і недовготривалих космічних польотів зауваження такого змісту просто корисне, то для умов ДКП воно може скласти цілу наукову програму, без розв'язання якої не може бути і мови про успішну реалізацію виходу КК на далекі міжпланетні траси. Адже з повним виходом КК за межі земної атмосфери і магнітосфери його екіпаж, оранжерея бортових рослин, напівпровідникова елементна база ЕОМ, системи автоматики, наддалекого зв'язку, телеметрії і навіть джерел автономного електроживлення мають бути надійно захищеними від згубного впливу космічної радіації. Переконливим застереженням в цьому відношенні можуть бути спостереження американських астронавтів Д. Скотта, Дж. Ірвіна і А. Уордена, які на КК «Аполлон-15» здійснили (в 1971 р.) 12-добову мандрівку на Місяць. За даними [31], перебуваючи у захисних темних окулярах, вони протягом однієї години зареєстрували 61 космічний спалах. Вважають, що ці спалахи (про які повідомляли і інші астронавти) обумовлені впливом космічних частинок високих енергій на сітківку ока, зорові шляхи, чи відповідну ділянку кори

головного мозку. Детальнішу інформацію було отримано при дослідженнях шоломів астронавтів КК «Аполлон-8» (який в 1969 р. 10 разів облетів навколо Місяця при загальній тривалості мандрівки 6 діб і 3 години), а також астронавтів КК «Аполлон-12» Ч. Конрада, А. Біна і Р. Гордона, які в листопаді 1969 р. на протязі 10 діб і 4.5 години подорожували на Місяць, причому Ч. Конрад і А. Бін здійснили висадку на його поверхню і перебували там 15.5 години. В матеріалі їхніх шоломів були теж виявлені і кількісно досліджені треки важких високоенергетичних космічних частинок [39].

Відмітимо, що тривалість згаданих вище космічних мандрівок до Місяця складала 6—10 діб. Екстраполяція їхніх результатів на тривалість у два роки привела експертів Комітету з наукових питань, пов'язаних з освоєнням космічного простору (під керівництвом американського психофізіолога професора Д. Ліндслі), до висновку, що «під час тривалих космічних польотів може виникнути пошкодження невеликої, але функціонально значимої кількості клітин сітківки та різних структур мозку. Таким чином, видається конче необхідним подальше вивчення цих важких частинок і тієї шкоди, яку вони можуть нанести здоров'ю космонавта під час тривалого польоту, а також пошук ефективних засобів захисту» [31].

За допомогою штучних супутників Місяця і Марса, а також за допомогою радянського КА «Лунohod-1» (1970—1971 рр.) були проведені тривалі і надійні вимірювання варіації складу та інтенсивності космічних променів за межами магнітосфери Землі.

Космічні промені, які досягають міжпланетних трас, приходять із світового простору (галактичні космічні промені) переважно у вигляді протонів з дуже високою енергією порядку  $10^9$  еВ (енергія окремих протонів може сягати  $10^{21}$  еВ), а також від Сонця — у вигляді протонів (83 %),  $\alpha$ -частинок (16 %) і ядер важких елементів: азоту, кисню і деяких металів (1 %). Середня швидкість сонячних протонів складає 500 км/с (а в періоди сонячної активності — 1500 км/с).

Бомбардування високоенергетичними потоками космічних частинок можуть стати нездоланою перешкодою реалізації ДКП, якщо не буде побудовано надійного захисту КК і його екіпажу.

Не маючи (з відомих причин) ніякої надії на створення металевого «антирадіаційного щита», еквівалентного за своїми захисними можливостями земній атмосфері (приблизно 1.25-м шар сталі), а також беручи до уваги, що космічні промені — це переважно заряджені частинки високих енергій,

дослідники та інженери нашого часу мріють створити такий щит на основі використання сильного магнітного поля напруженістю в декілька десятих долей тесла [31]. Саме воно має надійно захищати від радіаційних космічних потоків частинок високих енергій як КК, так і весь його вміст.

Проектувати живлення електромагніта, який би забезпечував таку напруженість поля навколо КК можна лише в розрахунку на використання надпровідних намоток, які до того ще й мають бути механічно і радіаційно стійкими. Напевне, тільки надпровідні при відносно високих температурах (ВТНП) матеріали недалекого майбутнього, які мають характеризуватися високими значеннями критичної температури  $T_{kp}$  і критичного магнітного поля  $H_{kp}$  (що руйнує в намотці надпровідність) зможуть розв'язати і іншу, не менш складну проблему, — щоб зовнішнє захисне поле само не могло попадати в об'єм КК, де буде створено аналог ГМП. Для цього, як уже зараз можна очікувати, необхідно буде подолати досить непрості технічні труднощі. Але і це в принципі можна буде реалізувати, якщо врахувати, що в матеріал (який знаходиться в докритичному стані надпровідності) магнітне поле практично не проникає (ефект Мейснера).

Оскільки далі мова буде йти про об'єкти живої природи, залишається з'ясувати, чому попадання в об'єм КК сильного магнітного поля не тільки небажане, але, можна думати, і недопустиме. Спершу декілька слів про об'єкти неживої природи в сильному МП. Тривожно в цьому відношенні є така обставина: під впливом сильного МП (сотні мілітесла) в технічних відсіках незаекранованого КК напівпровідникова елементна база ЕОМ, засоби зв'язку, автоматики та інших систем (з електричними струмами) зазнають деяких оборотних чи навіть необоротних змін, а можливо, і взагалі вийдуть за допустимі межі експлуатаційних режимів, що може привести до зовсім не передбачуваних наслідків. Це ж в повній мірі стосується і об'єктів живої природи, адже корисні мікроорганізми, представники рослинного світу (відповідальні за відтворення біомаси), як і самі астронавти, вимушенню були б жити і працювати в зовсім не властивому для них магнітному середовищі.

Залишаючи поки що без обговорення електротехнічний бік справи про шкідливий вплив сильних МП на електротехнічні системи, відносно яких можна здійснити необхідні оцінки, розглянемо вплив сильного МП (необхідного для ефективного екранування КК від заряджених космічних частинок високих енергій) на представників живої природи. На жаль, теоретично оцінити вплив сильних

МП на біологічні об'єкти різного рівня організації в умовах довготривалого перебування в міжпланетному просторі неможливо. Немає також відповідних експериментальних даних. Єдина можливість — це екстраполювати ту не надто багату інформацію, що була отримана в земних умовах.

Нагадаємо лише надійно встановлені факти про вплив короткочасної дії сильних МП на живі организми.

1. Поля 2—6 мТл викликають реакцію підсилення росту довжини стеблин і корінців бобових (рис. 5), але при напруженості 0.4 і 1.2 Тл спостерігається гальмівна дія поля [19]. Немонотонність реакції рослин на монотонну зміну напруженості МП засвідчуєть і результати робіт [2, 3, 5] (рис. 6 і 7). Видно, що: а) ГМП має велику екологічну значимість (досить порівняти між собою лише два верхні рядки на рис. 6); б) магнітобіологічний ефект не пропорційний МП, а є його складною функцією.

Відносно невеликі магнітні поля (4.5 мТл) стримують процес старіння (деградації) насіння, яке зазнає магнітної обробки в стані біологічного спокою. Крім того, така попередня магнітна обробка насіння озимої пшениці забезпечує активніше проростання як у відносно слабких полях (порядку ГМП), так і в достатньо сильних МП (300—465 мТл) незалежно від їхньої однорідності [4].

2. Вже в середині XIX і на початку ХХ ст. стало відомо, що циклічність багатьох процесів у біосфері збігається з циклічністю сонячної активності [25, 32], і найвірогіднішим посередником між сонячною активністю і біосферою є коливання ГМП (тобто наявність геомагнітних бур, які безпосередньо пов'язані зі змінами сонячної активності).

В роботі [23] вивчався вплив ГМП на репродуктивну функцію щурів, яких розміщували на весь період вагітності у полі 26.5 і 3 мТл). Було вико-

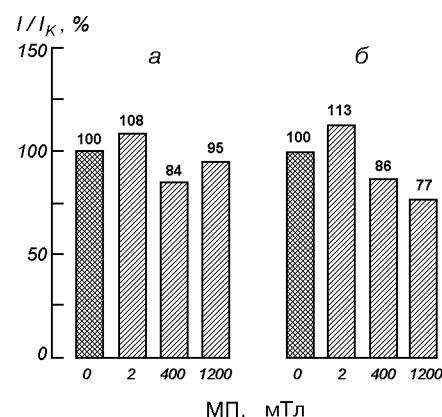


Рис. 5. Вплив магнітних полів різної напруженості на довжину стебел (а) і коренів (б) чотириденних проростків бобових [19]

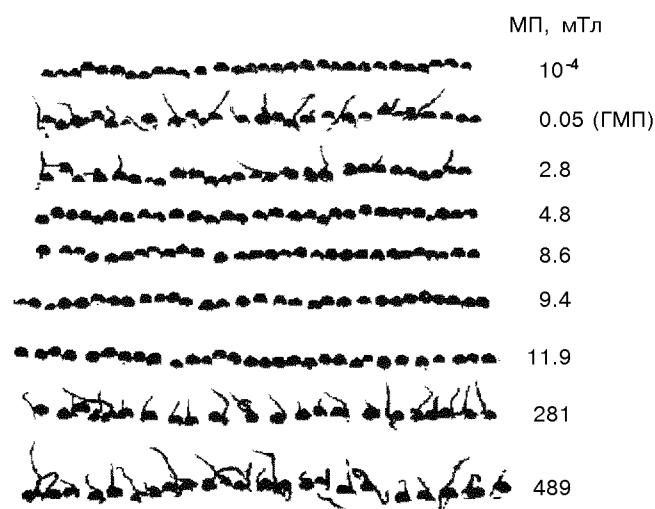


Рис. 6. Результати 4-добового проростання насіння гороху в магнітних полях різної напруженості за інших рівних умов

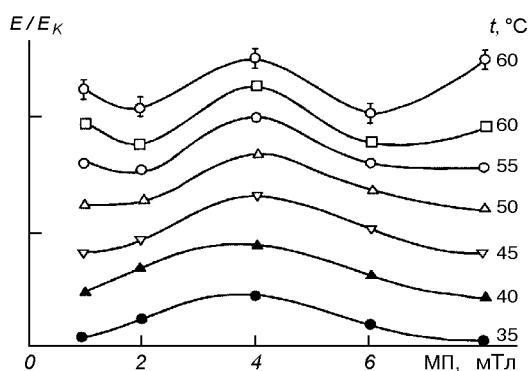


Рис. 7. Магнітопольові залежності енергії проростання не скрифікованого насіння люцерни при фіксованих значеннях температури [5]

ристано 60 самиць і 323 ембріонів. Вплив МП 26.5 мТл зумовив збільшення постімплантаційної загибелі плодів ( $22.22 \pm 5.73\%$  в досліді проти  $3.70 \pm 2.77\%$  в контролі) і загальної ембріональної смертності ( $41.67 \pm 5.93\%$  в досліді проти  $14.05 \pm 3.25\%$  в контролі).

При вивчені впливу полів 10.2 і 3.15 мТл на естральний цикл в 78 самиць використано 4-місячний вплив (по 1.5 год щоденно, крім вихідних). Досліди показали, що поле 10.21 мТл призводило до значного подовження еструсу; здатність тварин до запліднення зберігалася, але хід вагітності залишав помітних зрушень (пологи затримувалися до 24–31 діб проти 22–23 діб в контролі). Величина приплоду і вага потомків не відрізнялися у порів-

нюваних групах, але життєздатність піддослідних щурят була різко пониженою: постнатальна загибелі приплоду, який піддавався впливу поля 10.21 мТл, досягла 64.0 % проти 19.34 % в контролі ( $P < 0.05$ ). Самиці, що зазнавали впливу поля 3.2 мТл в час вагітності, дали потомство, яке не відрізнялось від контрольного.

В роботі [10] проведено досліди в чотирьох серіях (1, 5, 10 і 20 мТл) при вивчені одноразового впливу поля (протягом 10, 20, 30 і 60 хв) на білих щурів. Встановлено появу неспецифічної реакції з боку організму, яка залежала від напруженості МП і протяжності його впливу (експозиції). В динаміці їхнього розвитку спостерігалися чіткі кількісні зрушения складу периферичної крові і появу деяких змін в органах ретикулоендотеліальної системи. Другий період (до 7 діб) характеризувався відносним зменшенням морфологічних проявів у досліджуваних органах протягом двох-трьох діб з їхньою стабілізацією на четверту — сьому добу. У третій період відбувався зворотний розвиток змін, які повністю зникали до 30-го дня після омагнічення. Відмічена періодичність чітко проявлялася при режимах, що відповідали 5 і 10 мТл, при їхній дії протягом 20–60 хв. Але загальне омагнічення щурів МП в 20 мТл з експозицією в 30–60 хв призводило до смерті тварин в перші години після впливу МП. Омагнічення проводилися в МП соленоїда.

При вивчені впливу ПМП на добові біоритми морських свинок в роботі [17] були використані такі тестові показники: потенціал кори головного мозку, потенціал шкіри, її опір постійному струмові, температура тіла і рухова активність. Джерелом ПМП був прилад медичного призначення «Полюс-4М». При шестигодинній експозиції ПМП з напруженістю від 30 до 240 мТл в омагнічених тварин виникало добове підвищення рухової активності. В час дії МП (і особливо протягом перших шести годин після його виключення) змінювались ритми електричних коливань в мозку, згладжувалися добові ритми потенціалу шкіри, знижувалися коливання температури тіла і опору шкіри. Найвищим рівнем збудження характеризувалися МП 60–120 мТл. Постійне МП з напруженістю 450 мТл приводило до гальмування рухової активності тварин і суттєвих змін в інших тестах. Вплив його протягом 24 год знижував рухову активність більш ніж у 5 разів. Температура тіла тварин знижувалася на 0.5–1 °C, і розвивався стан, близький до заціпеніння.

Детальне дослідження змін складу крові кроликів і мишей під впливом ПМП (70 і 30 мТл) проведено в роботі [1]. Показано, що: а) зміни показників крові залежать як від напруженості МП, так і від

Таблиця 2. Показники крові мишей в нормі при дії магнітного поля напруженістю 30 мТл [1]

Показник	Контроль	Через 4 год	Через 6 год	Через 10 год	Через 14 год	Через 18 год
Гемоглобін, гр	16.2±0.16	15.7±0.3	14.3±0.51	13.7±0.75	13.2±0.8	12.7±0.7
Еритроцити за хв	8.8±3.2	7.09±2.84	5.8±0.35	5.5±0.5	4.4±0.2	4.0±7.6
Лейкоцити	8400±160	9000±170	910±200	9300±120	9400±200	9400±180

часу його впливу на живий організм тварин; б) вплив ПМП приводить до зменшення кількості еритроцитів і гемоглобіну, в той час як кількість лейкоцитів, тромбоцитів і ретикулоцитів при цьому збільшується, що засвідчують і дані табл. 2. Показано також, що ПМП знижує реакцію осідання еритроцитів, підвищуючи в'язкість крові і скорочуючи час її звертання.

Такі ж висновки зроблено і в роботі [14], де досліджувався час звертання (і інші характеристики) крові в робітників-електролізників з різним стажем роботи (від 1 до 15 років) в алюмінієвій промисловості, яким доводилося весь час працювати в магнітних полях розсіяння дуже сильних електрических струмів.

Згідно з даними огляду [29] нервова система може реагувати на вплив магнітного поля як безпосередньо, так і рефлекторним шляхом. Там же стверджується [8], що дія МП вище певного рівня напруженості може несприятливо впливати на організм людини в умовах виробництва, алегранично допустимі рівні напруженості мають бути науково обґрунтованими.

На записах електроенцефалограм білочкоподібних мавп, яких розміщували в ПМП напруженістю до 9.2 Тл [38] відмічалось підвищення частоти (від 8—12 до 14—50 Гц) і амплітуди (від 25—50 до 50—400 мкВ), а після одноденного перебування таких тварин в ПМП 10 Тл в них помітно знижувалася частота серцевих скорочень і підвищувався ступінь синусової аритмії [35, 37]. До цього лише слід додати, що відмічені досліди були поки що проведені лише в умовах земної гравітації. І отже, наслідки комбінованого впливу ПМП такої високої напруженості в умовах МГ поки що повністю невизначені.

Підводячи деякі підсумки, можна стверджувати таке.

1. Накопичена до кінця ХХ ст. наукова інформація в області магнітобіології [12, 13, 16, 27, 36] є переконливим свідченням того, що задачу регенерації біомаси і запасів кисню під час ДКП можна буде успішно розв'язати лише за умови, що на борту КК буде штучно відтворюватися магнітна обстановка, близька до земної. Як було виявлено останнім часом, геомагнітне поле є для живої

природи одним із важливих екологічних факторів навколошнього середовища. Жоден живий організм не може бути усунутим з геомагнітного середовища без серйозних наслідків для нього.

2. Підвищені вимоги до економії електроенергії на борту орієнтують розробку електромагнітного антирадіаційного захисту КК (призначеного для реалізації ДКП) на основі високотемпературної (кімнатотемпературної) надпровідності. Її розробка і практичне освоєння, за думкою академіка В. Л. Гінзбурга [9], є однією з важливих наукових проблем початку ХХІ ст., яка в запропонованому ним переліку 30 актуальних наукових проблем посідає друге місце після керованого ядерного синтезу.

Таким чином, у зв'язку з проектуванням ДКП майбутнього науковій спільноті світу потрібно буде, на наш погляд, акцентувати особливу увагу на розробці антирадіаційного захисту КК і його еkipажу за допомогою своєрідного «магнітного щита», а також зосередити особливу увагу на вивчені взаємодії магнітних полів (а можливо, магнітних полів у сукупності з високоенергетичною складовою космічних променів) з біологічними об'єктами різного рівня організації. Ці ділянки в загальній проблемі освоєння космічного простору, як найбільш наукоємні, характеризуються поки що і найнижчим рівнем своєї готовності до практичного використання.

Констатуючи практичну неможливість розробки антирадіаційного електромагнітного захисту КК на основі використання надпровідності металів при температурі рідкого гелію (4.2 K), ставку на розв'язання цієї проблеми можна пов'язувати лише з розробкою механічно і радіаційно стійких матеріалів, які будуть характеризуватися кімнатотемпературною надпровідністю і високими значеннями критичних магнітних полів. Лише розв'язання цієї задачі відкриє шлях до впровадження в космічну техніку легких і надійних в експлуатації засобів електромагнітного захисту КК від згубного впливу космічної радіації під час ДКП.

Можна надіятися, що розробка матеріалів з кімнатотемпературною надпровідністю особливо не забариться, адже на такі матеріали уже зараз існує соціальне замовлення (як у свій час воно існувало

на розробку атомної зброї). Від прогресу в цій галузі науки безпосередньо залежить не тільки реалізація ДКП, але також і вся енергетика майбутнього, а отже, добробут і комфорт в житті людської спільноти.

Автори вдячні академіку НАН України Л. М. Лобанову і члену-кореспонденту НАН України Є. Л. Кордюм за виявлений інтерес до розглянутих в огляді матеріалів і корисне їхнє обговорення.

1. Абдуллина З. М. Биологическое действие магнитных полей на живой организм. — Фрунзе: Кыргызстан, 1975.—148 с.
2. А. с. 913993 СССР, МКИ Способ предпосевной обработки семян (магнитным полем) / П. И. Баранский, Л. Т. Мищенко. — Опубл. 23.03.82, Бюл. № 11.
3. Баранский П. И., Мищенко Л. Т. Изменение спектров ЭПР в покоящихся семенах некоторых сельскохозяйственных растений, возникающие под влиянием постоянных внешних магнитных полей // Докл. АН УССР. Сер. Б.—1979.—№ 10.—С. 843—845.
4. Баранский П. И., Мищенко Л. Т. Экспериментальное доказательство влияния магнитных полей на семена зерновых культур в состоянии биологического покоя и в процессе их прорастания // Электронная обработка материалов.—1986.—№ 1 (127).—С. 69—72.
5. Баранский П. И., Мищенко Л. Т., Паша П. Н. Температурные и полевые зависимости энергии прорастания семян люцерны от их обработки в постоянном магнитном поле перед посевом // Электронная обработка материалов.—1982.—№ 3.—С. 75—77.
6. Введенский В. Л., Ожогин В. Й. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. — М.: Наука, 1986.—200 с.
7. Виленчик М. М. Магнитные эффекты в биологии // Успехи современной биологии.—1967.—63, № 1.—С. 54—72.
8. Вялов А. М. Клинико-гигиенические и экспериментальные данные о действии магнитных полей в условиях производства // Влияние магнитных полей на биологические объекты. — М.: Наука, 1971.—С. 165—177.
9. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге ХХI в.)? // Успехи физ. наук.—1999.—169, № 4.—С. 419—441.
10. Демецкий А. М., Розвадовский В. Д., Сурганова С. Ф. и др. // Матер. III Всесоюз. симп. «Влияние магнитных полей на биологические объекты»: Тез. — Калининград: КГУ, 1975.—С. 154—155.
11. Дубров А. П. Влияние гелиофеофизических факторов на проницаемость мембранных и суточную ритмичность выделения органических веществ корнями растений // Докл. АН СССР.—1969.—187, № 6.—С. 1429—1431.
12. Дубров А. П. Влияние геомагнитного поля на физиологические процессы у растений // Физиология растений.—1970.—17, № 4.—С. 836—842.
13. Дубров А. П. Геомагнитное поле и жизнь. — Л.: Гидрометеоизд, 1974.—175 с.
14. Забродина Л. В. Состояние свертывающей системы крови у электролизников с различным стажем работы в алюминиевой промышленности // Матер. III Всесоюз. симп. «Влияние магнитных полей на биологические объекты»: Тез. — Калининград, КГУ, 1975.—С. 161.
15. Казимировский Э. С. Мы живем в короне Солнца. — М.: Наука, 1983.—134 с.
16. Лебедев С. И., Баранский П. И., Литвиненко Л. Г. и др. Рост ячменя в сверхслабом магнитном поле // Электронная обработка материалов.—1977.—№ 3 (75).—С. 71—73.
17. Мещеряков Ф. А., Лапин В. И. Влияние постоянных магнитных полей на суточные биоритмы морских свинок // Матер. III Всесоюз. симп. «Влияние магнитных полей на биологические объекты»: Тез. — Калининград: КГУ, 1975.—С. 200—201.
18. Михайлівський В. Н., Красногорський Н. Н., Войчишин К. С. та ін. Про сприймання людьми слабких магнітних полів // Доп. АН УРСР. Сер. Б.—1969.—№ 10.—С. 929—933.
19. Новицкий Ю. И., Стрекова В. Ю., Тараканова Г. А. Действие постоянного магнитного поля на рост растений // Влияние магнитных полей на биологические объекты. — М.: Наука, 1971.—С. 69—88.
20. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков. Сварка и родственные технологии — в ХХI век // Сб. тр. междунар. конф. 1998 г. Киев. — С. 5—12.
21. Патон Б. Е., Гавриш С. С., Шульм В. Ф. и др. Ручные электронно-лучевые технологические работы в космосе // Автомат. сварка.—1999.—№ 10. (559).—С. 7—22.
22. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998.—184 с.
23. Перепечин Е. А. Влияние ПМП на репродуктивную функцию животных // Матер. III Всесоюз. симп. «Влияние магнитных полей на биологические объекты»: Тез. — Калининград: КГУ, 1975.—С. 99.
24. Почтарев В. М. Магнетизм Земли и космического пространства. — М.: Наука, 1966.—184 с.
25. Пресман А. С. Электрические поля и живая природа. — М.: Наука, 1968.—288 с.
26. Сагдеев Р. З., Салихов К. М., Молин Ю. Н. Влияние магнитного поля на процессы с участием радикалов и триплетных молекул в растворах // Успехи химии.—1977.—16, № 4.—С. 569—601.
27. Сытник К. М., Кордюм В. А., Кордюм Е. Л. и др. Микроорганизмы в космическом полете. — Киев: Наук. думка, 1983.—156 с.
28. Сытник К. М., Кордюм Е. Л., Недуха Е. М. и др. Растительная клетка при изменении геофизических факторов. — Киев: Наук. думка, 1984.—136 с.
29. Холодов Ю. А. Влияние магнитного поля на нервную систему // Влияние магнитных полей на биологические объекты. — М.: Наука, 1971.—216 с.
30. Холодов Ю. А. Реакция организма животных и человека на магнитные поля // Проблемы космической биологии. — М.: Наука, 1973.—Т. 18.—С. 143—163.
31. Человек в длительном космическом полете: Пер. с англ. под ред. и с предисловием О. Г. Газенко. — М.: Мир, 1974.—360 с.
32. Чижевский А. Л., Шишина Ю. Г. В ритме Солнца. — М.: Наука, 1969.—112 с.
33. Aceto H., Tobias C. A., Silver I. L. Some studies on the biological effects of magnetic fields // IEEE Transact on magnetics.—1970.—V. MAG.—6, N 2.—P. 368—373.
34. Beischer D. E. Biomagnetics // N. Y. State J. Med.—1965.—134.—P. 939.
35. Beischer D. E. US Naval Aerospace Medical Institute, Pensacola, Fla., NASA CR 94966.
36. Beischer D. E. Do Earth and Lunar magnetic fields have an effect on man and does man himself exert magnetic force? // 37-th Annual Scientific Meeting of Aerospace Medicine Association. Los Vegas, Newada. 1966 / Conley C. C. Effects of nearzero magnetic fields upon biological systems // Biological Effects of Magnetic fields. — New York: Plenum, 1969.—Vol. 1.—P. 29—52.
37. Beischer D. E., Knepton J. C // Aerospace Med.—1964.—

- 35.—P. 939—944.
38. Beischer D. E., Knepton J. C. The electroencephalogram of the squirrel monkey (*saimiri scuireus*) in a very high magnetic field. — 1966.—MAMI-972.
39. Comstock G. M., Fleischer R. L., Giard, et al. Cosmic-ray tracks in plastics: The Apollo helmet dosimetry experiment // Science.—1971.—172.—P. 154—157.
40. Miro et al. Биологическое действие гипомагнитных сред // Presse therm. et clim.—1970.—107, N 1.—P. 32—34.

---

**PROBLEMS CONNECTED WITH THE PROLONGED STAYING OF SPACECRAFT WITH ASTRONAUTS ON BOARD IN THE INTERPLANETARY SPACE**

**P. I. Baranskii, E. F. Venger, O. V. Gaidar**

Some problems connected with planning and practical realization of prolonged travels in the interplanetary space are discussed in detail.

The analysis of the present-day state of science and technique attests that:

— The electromagnetic protection against irradiation of the spacecraft (intended for prolonged space travel), its crew, necessary facilities for the reactivation of biomass and oxygen (in the form of space greenhouses or of practically useful microorganisms), semiconductor elemental base of onboard computers, systems of automatics and radiotelecommunications should be provided by using materials of the future only. These materials should be characterized by high-temperature superconductivity with high values of critical magnetic fields, and they should also possess mechanical reliability and radiation hardness.

— Normal functioning of crew members and other living objects as well as the operation of semiconductor elemental base of technical units and automatic facilities of the onboard systems can be provided only by creating such magnetic conditions on board the spacecraft which are close to the terrestrial condition. That is, the cabin of the spacecraft itself will be carefully shielded from the strong magnetic field (of an order of few kOe) which serves as an electromagnetic shield of the spacecraft from the cosmic (predominantly proton) radiation.

УДК 621.315.5+629.78; 62.982

П. І. Баранський<sup>1</sup>, В. М. Бабич<sup>1</sup>, С. В. Свєчніков<sup>1</sup>,  
Г. П. Гайдар<sup>2</sup>, Ю. Г. Птушинський<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ

<sup>2</sup>НЦ «Інститут ядерних досліджень», Київ

<sup>3</sup>Інститут фізики НАН України, Київ

Мікрогравітація і надвисокий вакуум —  
специфічні компоненти технологічного  
середовища і нові можливості  
напівпровідникової технології

*Надійшла до редакції 23.07.02*

Розглянуто роль мікрогравітації (залишкових мікроприскорень), а також надвисокого вакуума при вирошуванні напівпровідникових кристалів за допомогою безампульної безтигельної зонної плавки на борту космічного корабля в умовах орбітального польоту. Обидва розглянуті вище фактори мають дуже суттєве значення для космічної технології напівпровідниковых матеріалів.

Основу напівпровідникової технології складають:

- отримання структурно досконалих і вільних від домішок (як легуючих, так і залишкових) високоякісних монокристалів;
- можливість ефективно змінювати їхні електрофізичні, оптичні, механічні, та інші властивості за рахунок контролюваного, а якщо потрібно — то і прецизійного легування, термовідпалаю і радіаційного опромінення;
- відсутність принципових і, по можливості, технологічних ускладнень при виготовленні на основі відповідних монокристалів виробів електронної техніки в промислових умовах та ін.

За весь період розвитку космічних технологій найбільшу долю технологічних експериментів на космічних апаратах складають експерименти в галузі космічного матеріалознавства. Аналізуючи і узагальнюючи отримані результати, необхідно відповісти на ряд запитань, пов'язаних з фундаментальними дослідженнями фізико-технічного і технологічного профілю. Без активного розвитку цих досліджень неможлива організація конкурентоздатних і економічно вигідних виробництв в умовах космосу. До першочергових завдань космічного матеріалознавства, зокрема з напівпровідникової тех-

нології, на наш погляд, можна віднести пошук відповідей на такі запитання.

1. Який із способів прогрівання чи плавлення матеріалів з метою перекристалізації є найбільш ефективним в умовах мікрогравітації?

2. Чи можуть мікрогравітація і надвисокий вакуум (який в умовах молекулярного екрану відповідає тиску 1—100 пПа) сприяти одержанню монокристалів вищого рівня чистоти і структурної досконалості, ніж отримані в земних умовах?

3. Який із двох названих факторів космічного середовища може бути найсприятливішим для одержання в космосі унікально чистих і структурно досконалих напівпровідниковых кристалів, високоякісних надграток та інших продуктів космічної технології типу композитів, і за яких умов?

Відповідь на перше запитання була отримана ще в 1960-ті рр., при підготовці першого технологічного експерименту, коли найперспективнішим було визнано спосіб прямого чи непрямого електронно-променевого нагрівання [8, 13]. Правильність цього вибору була підтверджена і при розробці устаткування, призначеного для електронно-променевої безтигельної зонної плавки (чи перекристалізації) кристалів кремнію і інших матеріалів як в земних

умовах, так і в умовах мікрогравітації [12, 14, 22]. Нижче зосередимося на обговоренні двох інших питань.

### МІКРОГРАВІТАЦІЯ І ПРОБЛЕМИ ВИРОЩУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ

Якщо не зважати на мізерну зміну магнітного поля від 50 мкТл до 1—0.1 мкТл, яка супроводжує перехід космічних апаратів із Землі на навколоzemні орбіти, і яка для об'єктів неживої природи, захищених якимось екраном від впливу космічної радіації, суттєвого значення не має, то мікрогравітація і надвисокий вакуум залишаються найважливішими факторами космічного «технологічного середовища». Однакож кожен із цих двох факторів в різних технологічних процесах, і по відношенню до речовин в різному агрегатному стані, проявляє себе по-різному, а отже, і їхня значимість для відповідних процесів буде суттєво різною як за величиною прояву, так і за фізико-технологічним змістом.

Дійсно, результати багаторічного вивчення технологічних процесів, пов'язаних з фазовими переходами (вирощування напівпровідникових кристалів, їхня перекристалізація і т. п.), дозволяють стверджувати, що для всіх без винятку процесів, пов'язаних з участию речовини, що знаходиться в рідкому стані, перехід від земного тяжіння до умов мікрогравітації має вирішальне значення. Перш за все, за умови мікрогравітації практично зникає звична температурно-гравітаційна конвекція і, як підкреслював в своїй програмній статті В. С. Авдуєвський [1], «при цьому зникають сили, пов'язані з притяганням до Землі, але залишаються сили взаємодії між тілами і окремими частинками, зберігаються напруження усередині тіл внаслідок попереднього натягу і за рахунок різниці температур, а також сили, що виникають при переміщенні тіл усередині КА. Зберігаються всі сили молекулярної взаємодії. Багато явищ, які звичайно не враховуються, можуть при цьому набути вирішального значення». До числа таких необхідно в першу чергу віднести сили поверхневого натягу, які визначають сферичну форму вільних об'ємів рідини, а при наявності градієнта температури чи концентрації домішки — призводять до виникнення термокапілярної чи концентраційно-капілярної конвекції (конвекції Марангоні) і загальної зміни механізму тепло- і масопереносу.

Як показали вимірювання, прискорення масових сил на станції «Салют» у процесі її функціонування зазнавали змін від  $10^{-5} g$  до  $3 \cdot 10^{-3} g$  по модулю

величини, при цьому вони могли змінювати навіть свій знак протягом кількох секунд [1]. Ця обставина, а також відома висока гравітаційна чутливість процесу росту кристалів (і взагалі рідин) до зовсім мізерних залишкових прискорень, і особливо до їхніх змін у часі, приводять до висновку, що однорідності розплаву можна досягнути лише при значеннях мікроприскорень, не більших від  $10^{-6}$ — $10^{-7} g$  [7]. Крім того, стабільність процесу росту кристалів і епітаксійних плівок в умовах мікрогравітації виявилася досить чутливою не тільки до мізерних за абсолютною величиною залишкових прискорень, але також і до орієнтації вектора прискорення відносно напрямку їхнього росту [4]. Згідно з дослідженнями [6, 7], для отримання на борту КА високоякісних однорідних напівпровідникових кристалів з рідкої фази перш за все необхідно звести до мінімуму небажаний вплив мікроприскорень на процеси росту кристалів. Використовуючи, наприклад, деякі засоби типу віброзахисних платформ, ростове обладнання можна ізолювати від шкідливого впливу вібрацій, але вплив залишкових прискорень при цьому ще не буде усунутим. Для того щоб суттєво зменшити вплив поперечної до напрямку кристалізації складової залишкових прискорень, необхідно розміщувати ростову піч якнайближче до центра мас КА, де залишкове прискорення не перевищує  $10^{-7} g$ , причому так, щоб вектор швидкості направленої кристалізації і сумарний вектор залишкових прискорень були антипаралельними.

На завершення розгляду проблем, пов'язаних з мікрогравітацією, слід наголосити на якісних відмінностях гідродинаміки рідини в земних і космічних умовах, що пов'язано як зі зменшенням сили Архімеда, так і з нелінійністю взаємодії сил в'язкості та інерції. За думкою П. К. Волкова [5], що близче мікрогравітаційна обстановка до повної невагомості, тим суттєвішими будуть відмінності космічної гідродинаміки у порівнянні із земними умовами і тим характерніше проявлятимуться різні за своєю природою збурення негравітаційного типу. В результаті цього спрощені уявлення про вплив мікрогравітації на гідромеханіку рідких середовищ, що базуються на формальному зменшенні параметра сили тяжіння, виявляються недостатніми і фізично не обґрунтованими.

### РОЛЬ НАДВИСОКОГО ВАКУУМУ В НАПІВПРОВІДНИКОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

Переходячи до аналізу ролі надвисокого вакууму в напівпровідникової технології, впровадженням яко-

го забезпечується останнім часом зrimий і досить впевнений перехід від мікро- до наноелектроніки і нанофотоніки [9, 10], слід взяти до уваги необхідність використання надчистої речовини з концентрацією електрично активних і електрично пасивних домішок в монокристалах Si порядку  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  ( $10^{11}$  ат. %). Проте при вирощуванні кристалів кремнію за Чохральським в атмосфері аргону, або у вакуумі за методом безтигельної зонної плавки — у кристалах залишається відповідно  $(7..8) \cdot 10^{17}$  та  $(1..3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  атомів кисню [20], що на п'ять порядків перевищує концентрацію електрично активної домішки, за якою з невиправданою легкістю характеризують іноді рекордно високу чистоту кремнію. Та, напевне, за умови, що домішка кисню в кристалах кремнію була б електрично нейтральною, з цим частково і можна було б погодитися. Ale ж насправді це не зовсім так: адже за деяких умов термічної обробки наявність домішки кисню в кристалах Si призводить до утворення електричної навіть ЕПР-активних термодонорів [16]. Активність домішки вуглецю в об'ємі кремнію (у всякому випадку, неопроміненого електронами), менша [20, 23], проте сказане вище стосується і її.

Згідно з рівнянням стану для ідеального (сильно розрідженої) газу

$$p = nkT,$$

де  $p$  — тиск,  $n$  — концентрація атомів (молекул), значенню тиску  $p = 4 \text{ мPa}$  відповідає (при  $T = 293 \text{ К}$ ) концентрація атомів (чи молекул) газу порядку  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Навіть при такому значенні тиску перекристалізація кремнію (із залишковою домішкою кисню  $3.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) за допомогою електронно-променевого переплаву знижує концентрацію цієї домішки в кристалі лише на два порядки [2]. Є підстави вважати, що неможливість у зазначеніх вище умовах глибшого очищення кристалу Si пов'язана із значним зворотним потоком молекул газу на його поверхню. Адже при тиску 4 мPa потік молекул (наприклад, кисню) на поверхню Si складатиме близько  $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  і певною мірою компенсуватиме втрату кисню розплавленним зразком за рахунок випаровування. Тому для суттєвого зниження рівноважної концентрації кисню в кристалі бажано знизити тиск в робочій камері на 5—7 порядків, тобто до 0.1 нPa. Такі і навіть кращі вакуумні умови можуть бути реалізовані на орбіті за допомогою молекулярних екранів [19]. Тобто, у перспективі можна забезпечити вирощування (звичайно, в невеликих кількостях) практично вільних від залишкових газових домішок (кисню, азоту чи водню) кристалів кремнію, які так потрібні для створення чутливих лічильників високої роздільноти

здатності в ядерній енергетиці, для виготовлення еталонів відповідних параметрів у галузі стандартизації, а також для створення справді чистих матеріалів, призначених для нейtronного чи (у звичайних умовах) високоточного за рівнем компенсації або просто прецизійного легування. Подібно до того, як перехід до використання надвисокого вакууму порядку 1—10 нPa у галузі фізичної електроніки забезпечив розв'язання таких фундаментальних задач, як з'ясування глибинних деталей механізмів адсорбції та будови поверхні (наприклад, адсорбції водню на поверхні переходних металів) [11], або спостереження поверхні кремнію з атомною роздільною здатністю і міграції окремих атомів [17], так і в космічному матеріалознавстві використання надвисокого вакууму обіцяє суттєво розширити можливості отримання надчистих напівпровідникових матеріалів.

Можна також сподіватися на практичну реалізацію (в умовах надвисокої стерильності) молекулярно-променевого способу виробництва гетероструктур і надграток [3].

Здобутки космічного матеріалознавства у цьому напрямку можуть виявитися надзвичайно корисними також для удосконалення фундаментальних досліджень і для практичного використання гетеросистем типу метал — ізолятор — метал [21], а також острівцевих плівок [15, 18]. Останні, як відомо, складаються з ансамблю тунельно-пов'язаних металевих острівців з напівпровідниковим характером температурної залежності їхньої електропровідності і рядом специфічних особливостей їхньої фото- і електролюмінесценції при проходженні електричного струму. Необхідно, проте, зауважити, що як мікрогравітація, так і надвисокий вакуум потрібні там, де мова йде про вирощування методом електронно-променевої безтигельної зонної плавки надчистих і досконаліх напівпровідникових кристалів та інших матеріалів (зокрема композитів) з унікальними властивостями. Взагалі кажучи, у всіх цих випадках, де фізико-технічні основи технологічного процесу безпосередньо пов'язані з фазовими переходами, за цих умов, на наш погляд, найбільш ефективні результати можуть бути досягнуті лише при комбінованому використанні як суворо контролюваної мікрогравітації, так і надвисокого вакууму.

Автори вдячні академіку НАН України А. Г. Наумовцю за корисне обговорення розглянутих питань.

1. Авдуевский В. С. Основные задачи исследования гидромеханики и теплообмена в условиях невесомости // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1985.—49, № 4.—С. 627—634.

2. Баранский П. И., Бабич В. М., Гайдар А. В. и др. Десорбция из монокристаллов кремния при электронно-лучевой бестигельной зонной плавке // Тез. Междунар. конф. по физике электронных материалов (ФИЭМ'02), (Россия, Калуга, 1—4 октября 2002). — Калуга, 2002.—С. 62—63.
3. Бержатый В. И., Зворыкин Л. Л., Пчеляков О. П. и др. Перспективы реализации вакуумных технологий в условиях орбитального полета // Автомат. сварка.—1999.—№ 10 (559).—С. 108—116.
4. Верезуб Н. А., Зубицкая И. Н., Егоров А. В. и др. Исследование особенностей получения некоторых полупроводниковых систем на установке «Сплав» // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1985.—49, № 4.—С. 687—690.
5. Волков П. К. Качественные различия в гидродинамике жидкости в земных и космических условиях // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.—2001.—№ 9.—С. 101—105.
6. Земсков В. С., Иванов Л. И., Савицкий Е. М. и др. Основные итоги экспериментов в условиях невесомости и некоторые проблемы космического материаловедения // Изв. АН СССР, сер. физ.—1985.—49, № 4.—С. 673—680.
7. Земсков В. С., Раухман М. Р., Шалимов В. П. Влияние условий микрогравитации на однородность кристаллов полупроводников, выращенных на космических аппаратах методами направленной кристаллизации. Итоги и перспективы исследований в ИМЕТ РАН // Поверхность, синхротронные и нейтронные исследования.—2001.—№ 9.—С. 41—47.
8. Космос: технологии, материалыоведение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000.—527 с.
9. Нанофизика и наноэлектроника: Тез. Второго российско-украинского семинара, Киев, 21—24 ноября 2000 г. — Киев: ИФП НАН Украины, 2000.—123 с.
10. Нанофотоника: Материалы совещания (Нижний Новгород, 26—29 марта 2001 г.). — Институт микроструктур РАН, 2001.—314 с.
11. Осовский В. Д., Птушинский Ю. Г., Чуйков Б. А. и др. Изотопные эффекты и проявление 2 фазных переходов в кинетике низкотемпературной (до 5 К) адсорбции водорода // Физ. низк. температур.—2001.—27, № 9/10.—С. 1138—1147.
12. Патон Б. Е., Аснис Е. А., Заболотин С. П. и др. Особенности получения полупроводниковых материалов в условиях микрогравитации // Автомат. сварка.—1999.—№ 10 (559).—С. 97—99.
13. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. Особенности и перспективы. — Киев: Наук. думка, 1998.—184 с.
14. Патон Б. Е., Лапчинский В. Е., Аснис Е. А. и др. Актуальные задачи получения материалов электронной техники в условиях микрогравитации // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 95—98.
15. Томчук П. М. Напівпровідниковий характер властивостей острівцевих металічних пілівок // Тезиси доповідей Міжнародної школи-конференції з актуальних питань фізики напівпровідників (м. Дрогобич., 23—30 червня 1999 р.). — Дрогобич: ДДПУ, 1999.—С. 60.
16. Baranski P. I. Babich V. M., Baran N. P., et al. Investigation of formation conditions of thermal donors-I and -II in oxygen-containing n-type Si within the temperature range 400 to 800 °C // Phys. Status Solidi (a).—1983.—78.—P. 733—739.
17. Bulavenko S. Yu., Melnik P. V., Nakhodkin M. G. STM-images of the atoms in the corner holes on the Si (111)7x7 surface with bismuth-covered tips // Surface Sci.—2000.—469.—P. 127—132.
18. Fedorovich R. D., Naumovets A. G., Tomchuk P. M. Electron and light emission from island metal films and generation of hot electrons in nanoparticles // Phys. Repts.—2000.—328, N 2-3. P. 73—179.
19. Melfi L. T., Outlaw R. A. Henser J. E., Brock F. J. Molecular shield: An orbiting low-density materials laboratory // J. Vac. Sci. and Technol.—1976.—13, N 3.—P. 698—701.
20. Nezaki T., Yatsurug Y., Akiyama N. Concentration and Behavior of Carbon in Semiconductor Silicon // J. Electrochem. Soc.—1970.—117, N 12.—P. 1566—1568.
21. Pagnia H., Sotnic N. Bistable switching in Electroformed Metal-Insulator-Metal Devices // Phys. Status Solidi (a)—1988.—108, N 1.—P. 11—65.
22. Paton B. E., Asnis E. A., Zabolotin S. P., et al. New capabilities of growing semiconductor materials by the method of electron beam crucibleless zone melting under microgravity // Космічна наука і технологія.—2000.—6, N 4.—P. 140—141.
23. Song L. W., Benson B. W., Watkins G. D. Bistable interstitial-substitutional carbon pair in silicon // Phys. Rev. B.—Solid State.—1990.—42, N 9.—P. 5765—5783.

---

#### MICROGRAVITY AND UTRAHIGH VACUUM AS SPECIFIC COMPONENTS OF TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT AND NEW FEASIBILITIES OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

P. I. Baranskyi, V. M. Babych, G. P. Gaidar,  
Yu. G. Ptushynskyi, S. V. Svechnikov

We discuss the role of the microgravity (residual microaccelerations) and ultrahigh vacuum in semiconductor crystal growth by means of the nonampule crucible-free zonal melting on the board of the spacecraft under orbital flight conditions. Both of the factors mentioned above are of great importance for the space semiconductor technology.