

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

київ

Том 14, № 3, 2008

KYIV

ЗМІСТ

Белов Д. Г. Влияние электроэнергетических дисбалансов на работоспособность космического аппарата в нештатных режимах

Горностаев Г. Ф. Волоконно-оптические датчики уноса теплоизоляции

Rekha Agarwal Mishra, Rajesh K. Mishra. Cosmic ray modulation at neutron monitor energies

Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк

CONTENTS

- | | |
|----|--|
| 4 | Belov D. G. The influence of electric energy disbalances on the spacecraft functionality under non-standard modes |
| 12 | Gornostaev G. F. Optical fiber sensors for heat-protection ablation |
| 19 | Рекха Агарвал Мишра, Раджеш К. Мишра. Модуляція космічних променів при енергіях нейтронного монітора |
| 29 | Chernogor L. F., Shamota M. A. Wave disturbances of geomagnetic field associated with rocket launches from the Plesetsk cosmodrome |

- Куссул Н. М., Шелестов А. Ю., Скакун С. В., Житомирська К. Г.** Автоматична система прогнозування міжпланетних ударних хвиль у сонячному вітрі
- Парновский А. С.** Прогнозирование D_{st} -индекса методом линейного регрессионного анализа
- Лялько В. І., Шпортиук З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М.** Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Нурегіон» для класифікації земного покриву
- Кочубей С. М., Казанцев Т. А., Донец В. В.** Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности
- Березовський В. Я., Літовка І. Г., Костюченко О. С., Янко Р. В.** Вплив мелатоніну на процеси фізіологічної регенерації кісткової тканини молодих та дорослих щурів
- 45** років Відкритому акціонерному товариству «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування». Основні історичні дати становлення та розвитку
- Зевако В. С., Желтов П. Н.** ОАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»: 45 лет создания и внедрения научноемких технологий в промышленность Украины
- Погорелов А. А., Желтов П. Н., Семенов Л. П.** Основные направления развития технологий неразрушающего контроля в ракетно-космической отрасли
- Алексеев Е. М., Хвостов М. Н., Ефимчук Б. П., Волков В. П.** Безжидостное измерение объемов узлов ракетно-космической техники
- Лившиц А. Б., Дон Ю. А., Желтов П. Н.** Энергосберегающее наноанодирование алюминиевых сплавов
- Сливинский В. И., Зевако В. С., Ткаченко Г. В., Карпикова О. А.** Сотовые заполнители в конструкциях авиационно-космического назначения
- 39** *Kussul N. N., Shelestov A. Yu., Skakun S. V., Zhytomirska K. G. Forecasting space weather: Automatic system for interplanetary shocks prediction*
- 48** *Parnowski A. S. D_{st} prediction using the linear regression analysis*
- 55** *Lyalko V. I., Shportyuk Z. M., Sakhatsky O. I., Sibirtseva O. M. The use of red edge indices and water indices from hyperspectral data from EO-1 Hyperion for land cover classification*
- 69** *Kochubey S. M., Kazantsev T. A., Donets V. V. The use of derivative vegetation indices for the elimination of interferences caused by soil reflection in remote sensing of vegetative cover*
- 75** *Berezovskiy V. A., Litovka I. G., Kostjuchenko A. S., Yanko R. V. Influence of melatonin on processes of the bone tissue physiological regeneration of young and adult rats*
- 82** *45 Years of Public Join Stock Company “Ukrainian Scientific Research Institute of Manufacturing Engineering”. The main historical dates of advancement.*
- 84** *Zevako V. S., Zhelтов P. N. Public Join Stock Company “Ukrainian Scientific Research Institute of Manufacturing Engineering” — 45 Years of creation and application of high technology to Ukraine industry*
- 88** *Pogorelov A. A., Zhelтов P. N., Semenov L. P. The main lines of ndt development in space-rockets techniques*
- 93** *Alexeev E. M., Khvostov M. N., Efimchuk B. P., Volkov V. P. Non-liquid measurement of volumes of units of space and missile technology*
- 98** *Livshits A. B., Don Yu. A., Zhelтов P. N. New energy saving method of nanooxide plating for aluminium alloys*
- 101** *Slyvyn's'kyi V. I., Zevako V. S., Tkachenko G. V., Karpikova O. A. Honeycomb cores for honeycomb structures of aerospace assignment*
- 108** **OUR AUTHORS**

НАШІ АВТОРИ

OUR AUTHORS

УДК 629.78

Д. Г. Белов

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

Влияние электроэнергетических дисбалансов на работоспособность космического аппарата в нештатных режимах

Надійшла до редакції 18.09.07

Проаналізовано проблему енергетичних дисбалансів, що виникають внаслідок позаштатних ситуацій на борту космічних апаратів. Визначено показники кількісної оцінки електроенергетичного забезпечення КА у таких ситуаціях і розроблено методика та алгоритми для їхнього розрахунку. На прикладі КА АУОС-СМ показано практичне застосування розробленої методики для дослідження впливу енергодефіциту на працевздатність КА у позаштатних режимах.

Свойство технического объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или при наличии дефектов и повреждений определенного вида, или отказа некоторых комплектующих характеризует его живучесть [6].

Применительно к космическому аппарату (КА) одним из важнейших факторов, необходимых для сохранения работоспособности, является энергообеспечение бортовой аппаратуры, ибо дефицит электрической энергии ограничивает функционирование КА и лимитирует возможности бортовых средств по выходу из нештатных ситуаций.

Физически производство электроэнергии на борту КА реализуется системой электроснабжения (СЭС), которая осуществляет преобразование неэлектрической энергии в электрическую и передачу ее потребителю — электрической нагрузке СЭС. Будучи составной частью КА, СЭС подвергается воздействию факторов космического пространства и находится в интенсивном взаимодействии с сопряженными системами КА и нагрузкой, образующими внешнюю по отношению к СЭС среду. В настоящее время в

обозримом будущем монопольное положение в электроснабжении околоземных КА принадлежит СЭС фотоэлектрического типа, которые преобразуют энергию солнечного излучения. Помимо текущей выработки электроэнергии на освещенных Солнцем участках орбиты, такие СЭС накапливают оперативный запас энергии с целью удовлетворения ситуативных энергозапросов нагрузки и ее питания на теневых участках орбиты.

Для исследования поведения СЭС при орбитальной эксплуатации КА она может быть представлена звеном агрегативной системы более высокого иерархического уровня (КА), которое посредством некоторого оператора выполняет преобразование входных энергетических потоков в выходные при определенных параметрах внешней среды [14]. Агрегативное описание фотоэлектрической СЭС имеет вид [4]

$$E(t) = A(B, Z, t)S(t),$$

где $S(t)$ — поток солнечной энергии, $E(t)$ — поток электрической энергии, $A(t)$ — оператор процессов преобразования, накопления и расходования энергии, $B(t)$ — совокупность функци-

ональных параметров СЭС, $Z(t)$ — внешняя среда.

Индикатором способности СЭС обеспечить нагрузку на i -м участке полета служит величина оперативного запаса энергии e_x [1]:

$$\begin{aligned} e_{xi} = e_x(t_i + \Delta\tau_i) &= e_x(t_i) + \int_{t_i}^{t_i + \Delta\tau_i} (N_C^*(t) - N_H(t)) dt, \\ 0 \leq t_i &\leq T_A - \Delta\tau_i, \\ 0 < \Delta\tau_i, e_{xmn} &\leq e_x(t) \leq e_{xms}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где N_C^* — эффективная мощность СЭС, N_H — мощность, необходимая нагрузке, e_{xms} — максимально возможный по аппаратному исполнению СЭС оперативный запас энергии, e_{xmn} — минимально необходимый для сохранения работоспособности СЭС запас энергии, T_A — срок жизни КА, t_i , $\Delta\tau_i$ — соответственно время начала и продолжительность i -го участка полета.

Управление процессом выработки и потребления энергии на борту КА построено так, что при достижении значения $e_x(t) = e_{xms}$ ограничивается генерируемая мощность СЭС, а при уменьшении e_x до e_{xmn} минимизируется энергопотребление нагрузки.

Эффективная N_C^* и потенциально генерируемая N_C мощность СЭС связаны соотношением $N_C^*(t) = \gamma(t)\Gamma(t)N_C(t)$, где $\gamma(t)$ — энергоуправляющая функция оператора $A(t)$:

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } e_x(t) < e_{xms}(t) \vee N_H(t) > N_C(t), \\ \frac{N_H(t)}{N_C(t)} & \text{при } e_x(t) = e_{xms}(t) \wedge N_H(t) \leq N_C(t), \end{cases} \\ \Gamma(t) &= \begin{cases} 1 & \text{на освещенном участке орбиты,} \\ 0 & \text{на теневом участке орбиты.} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Производство электроэнергии СЭС и спрос на нее на борту КА (нагрузка), как правило, не коррелированы, в связи с чем для гарантированного электроснабжения потребителей во всех расчетных условиях полета функциональные параметры СЭС определяются в предположении о сочетании минимальной энергопроизводительности СЭС и максимального энергопотребления

нагрузки на конец активного существования КА. Благодаря этому условие $e_x(t) > e_{xmn}$ выполняется в штатном режиме работы КА при всех $t \leq T_A$.

Нештатные ситуации возникают вследствие нарушения режимов работы КА, предусмотренных при проектировании. Если нештатная ситуация не затрагивает энергетических отношений СЭС — нагрузка, то КА в этой ситуации энергетически обеспечен. Однако, как показывает практика орбитальной эксплуатации КА, подавляющее большинство нештатных ситуаций отражается на производстве или/и потреблении электроэнергии, вызывая энергетический дисбаланс на борту КА. К ним относятся: отклонение внешней конфигурации КА от проектной, нарушение ориентации относительно солнечного потока, увеличение продолжительности включения или/и мощности нагрузки, более жесткие температурные условия [12]. К этому перечню необходимо добавить и выведение КА на нерасчетную орбиту. Это возмущение влияет на СЭС двояко. Во-первых, изменение параметров орбиты оказывается на условиях освещенности СЭС, во-вторых, оно может вызвать и вышеперечисленные негативные воздействия на СЭС.

На борту КА, как правило, имеются ресурсы и резервы, ввод в действие которых позволяет в той или иной степени парировать нештатную ситуацию и не дать перерасти ей в аварийную, чреватую прекращением функционирования КА. Но для оценки ситуации и осуществления восстанавливающих действий необходимо время, в течение которого от СЭС требуется обеспечить некоторый уровень энергообеспечения КА. При этом условия работы СЭС также отличаются от штатных. Отдельные аспекты этой проблемы рассматривались в работах [3, 4, 12].

Цель настоящей работы состоит в углубленном анализе проблемы электроэнергетического обеспечения КА и разработке алгоритмов его расчета как при летной эксплуатации, так и при проектировании КА.

Степень влияния нештатной ситуации на энергообеспеченность КА будем учитывать с помощью коэффициентов α_C и α_H , показывающих отношение мощностей СЭС и нагрузки при наличии и отсутствии возмущений, вызвавших нештатную ситуацию на КА:

$$N_{CB}(t) = \alpha_C(t)N_{CH}(t),$$

$$N_{HB}(t) = \alpha_H(t)N_{HH}(t),$$

где индексы «B» и «H» соответствуют возмущенному и невозмущенному режимам, $\alpha_C = \alpha_H = 1$ при отсутствии возмущений, $\alpha_C = \alpha_{CB} < 1$ и/или $\alpha_H = \alpha_{HB} > 1$ при наличии возмущений. (Не исключено и $\alpha_{CB} > 1$ и $\alpha_{HB} < 1$, однако далее эти случаи не рассматриваются, так как усиливают энергообеспеченность КА относительно штатной).

В качестве показателя живучести КА находит применение [7] промежуток времени Δt_* , необходимый для диагностирования ненштатной ситуации, выработки и осуществления мер по ее парированию. Тогда при возникновении в момент времени t_z ненштатной ситуации продолжительностью δt_z работоспособность КА будет энергетически обеспечена, если

$$\Delta t_c \geq \Delta t_*^* = \begin{cases} \Delta t_* & \text{при } \delta t_z \geq \Delta t_*, \\ \delta t_z & \text{при } \delta t_z < \Delta t_*. \end{cases} \quad (3)$$

где Δt_c — промежуток времени от t_z до снижения оперативного запаса энергии СЭС до e_{xmn} ,

$$\begin{aligned} 0 &\leq t_z \leq T_A, \\ 0 &< \delta t_z \leq T_A - t_z, \\ 0 &\leq \Delta t_c \leq T_A. \end{aligned}$$

Промежуток времени Δt_c будем считать показателем, а условие (3) — локальным критерием энергетического обеспечения КА в ненштатной ситуации.

Функциональные параметры СЭС $B(t)$ из-за естественной деградации убывают во времени, а энергопроизводительность СЭС зависит от освещенности ее фотопреобразующей поверхности, которая изменяется в ходе орбитального полета КА [5, 11]. В связи с этим ненштатные ситуации с одинаковыми значениями α_{CB} и α_{HB} приведут на различных участках полета КА к различным последствиям, т. е. на одном участке полета критерий (3) может удовлетворяться, на другом — нет. Действительно, если на каждом участке Δt_i внутри интервала $[t_z, t_z + \Delta t_*^*]$

$$\int_{t_z}^{t_z + \Delta t_i} \alpha_C(t) \gamma(t) \Gamma(t) N_C(t) dt \geq \int_{t_z}^{t_z + \Delta t_i} \alpha_H(t) N_H(t) dt,$$

то, как видно из (1), e_x не уменьшается, и

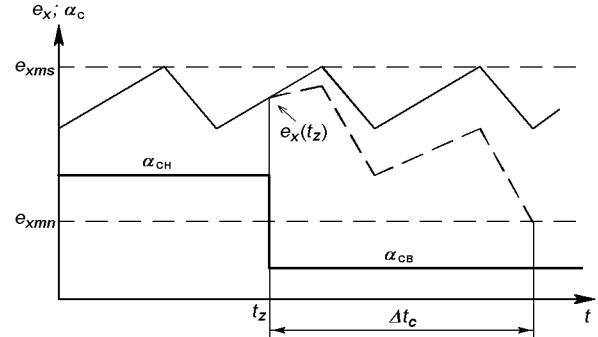


Рис. 1. Изменение оперативного энергозапаса СЭС в штатном (сплошная линия) и ненштатном (прерывистая линия) режимах работы КА

угрозы энергодефицита нет. В противном случае $e_x(t_i + \Delta t_i) < e_x(t_i)$, и на каждом участке Δt_i происходит уменьшение e_x на величину разности интегралов, так что достижение уровня e_{xmn} возможно (см. рис. 1). Аналогичная ситуация и при знакопеременной разности интегралов.

Таким образом, когда известны время появления ненштатной ситуации t_z , степень ее влияния на энерговозможности СЭС α_c и энергопотребление нагрузки α_h , состояние энергозапаса СЭС $e_x(t_z)$, то определение величины Δt_c и удовлетворения критерия (3) представляет детерминированную задачу, решаемую пошаговым вычислением e_x по (1) до достижения $e_x \leq e_{xmn}$ или $t - t_z \geq \Delta t_*^*$ при $e_x > e_{xmn}$. Соответствующий алгоритм приведен на рис. 2.

Если же энергообеспечение КА в ненштатной ситуации требуется оценить априори на стадии проектирования КА, когда могут быть заданы только значения α_c и α_h , то t_z и $e_x(t_z)$ становятся случайными величинами, ибо возникновение ненштатной ситуации — событие случайное. Совокупность параметров СЭС в момент t_z , с учетом начальных и деградационных неопределенностей, также представляет собой ограниченную выборку случайных величин из области прогнозируемых значений $B(t)$ [2]. Следовательно, и выполнение условия (3) есть случайное событие, так что в качестве показателя электроэнергетического обеспечения КА следует принять вероятность $P(\Delta t_c \geq \Delta t_*^*)$. При ограничении ее величиной P^* критерий выполнения требования по

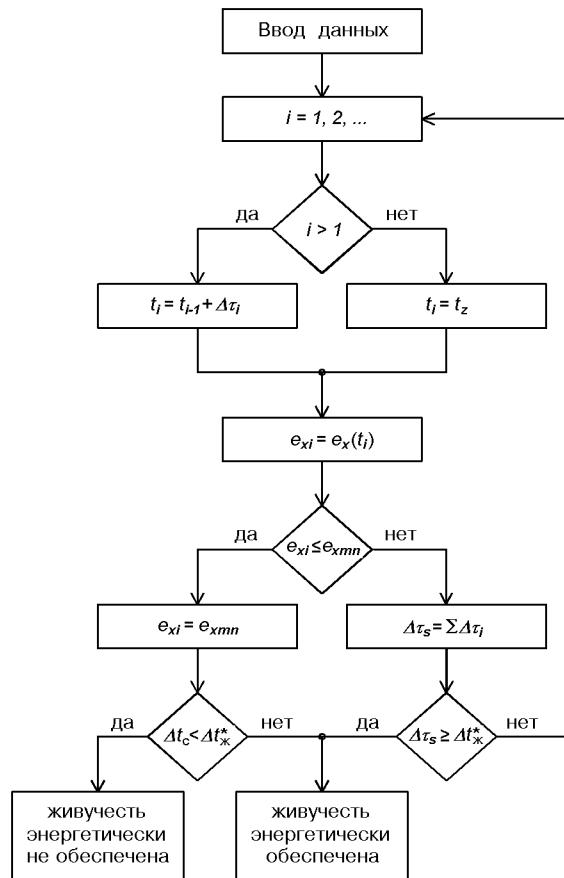


Рис. 2. Алгоритм расчета локального показателя и выполнения критерия энергообеспечения.

энергообеспечению имеет вид $P(\Delta t_c \geq \Delta t^*_*) \geq P^*$. Этот критерий будем называть интегральным. Задача определения показателя энергообеспечения и его соответствие интегральному критерию становится стохастической. Для ее решения необходимо располагать законами и параметрами распределений участвующих величин и использовать методы, применяемые при проектировании систем ракетно-космической техники со случайными параметрами [10]. В частности, на основе результатов, представленных в работе [2], методика определения показателя $P(\Delta t_c \geq \Delta t^*)$ базируется на каноническом методе статистических испытаний, при котором каждому случайному числу, выдаваемому с постоянной плотностью распределения в диапазоне от 0 до 1, приравнивается значение функции

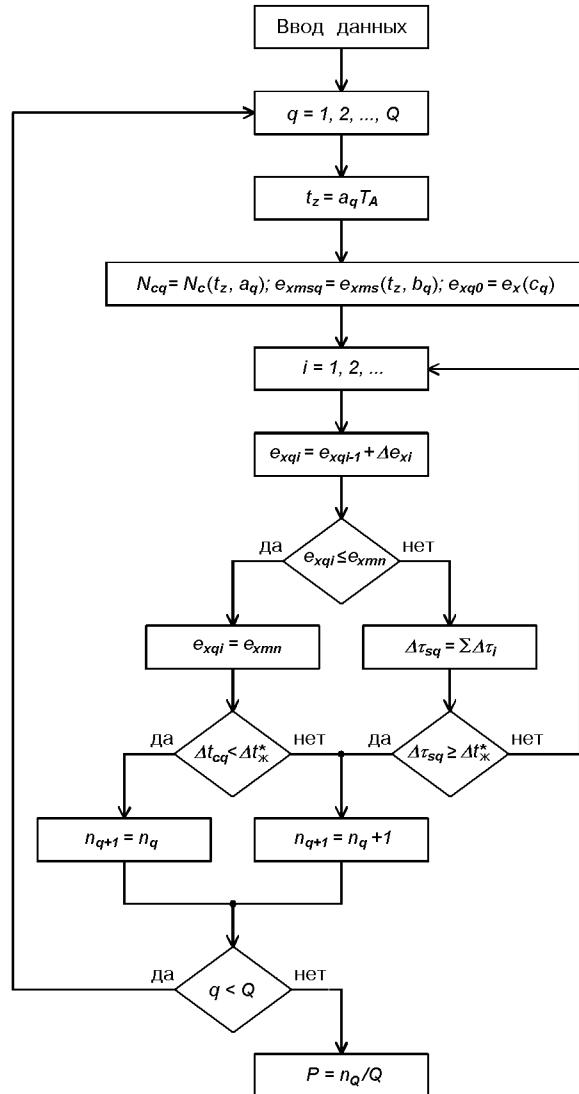


Рис. 3. Алгоритм расчета интегрального показателя энергообеспечения (a_q, b_q, c_q — случайные числа, n_Q — количество благоприятных исходов)

распределения, аргумент которой принимается в качестве значения искомой случайной величины. Отношение количества благоприятных исходов ($\Delta t_c \geq \Delta t^*$) к общему количеству испытаний полагается вероятностью энергообеспечения КА при определенной степени энергетического дисбаланса, вызванного нештатной ситуацией. Алгоритм решения представлен на рис. 3. На стадии проектирования КА может возникнуть и обратная задача — определить границу энерге-

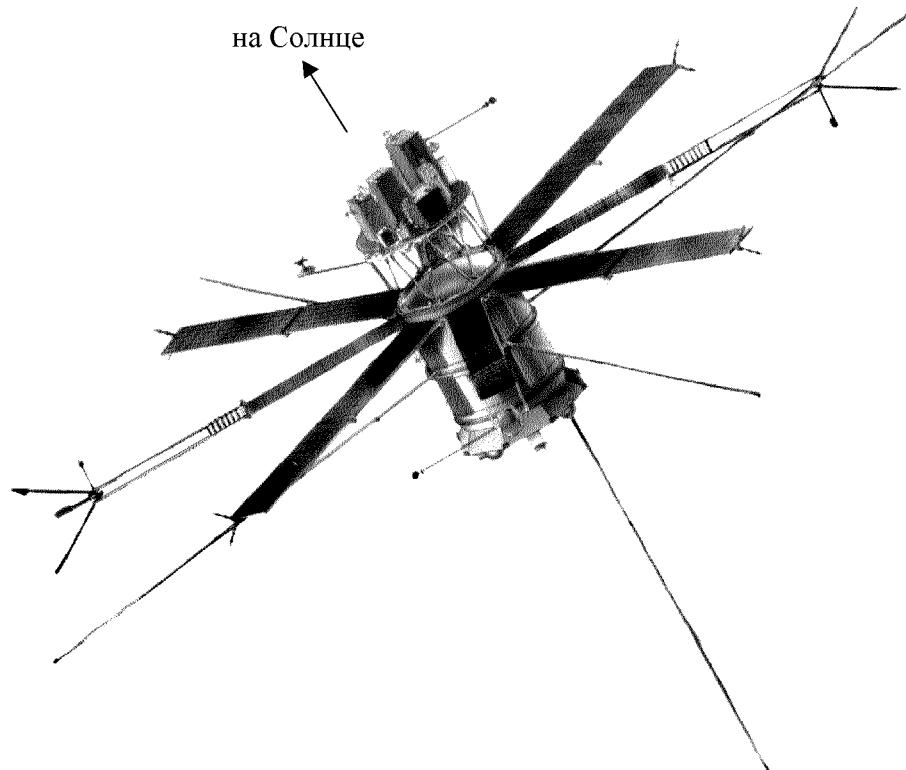


Рис. 4. Внешний вид модификации КА АУОС-СМ

тического дисбаланса в координатах α_{CB} , α_{HB} , при котором вероятность энергообеспечения КА равна заданной, т. е. найти такие сочетания $\alpha_{CB}^* = \alpha_{CB}^*$ и $\alpha_{HB}^* = \alpha_{HB}^*$, при которых $P(\Delta t_C \geq \Delta t_{*k}) = P^*$. Решение этой задачи осуществляется путем последовательного вычисления $P_{kj}(\Delta t_C \geq \Delta t_{*k})$ по алгоритму, показанному на рис. 3, при $\alpha_{HBk} = 1 + k\Delta\alpha_{HB}$ ($k = 1, 2, \dots, \Delta\alpha_{HB} > 0$) с итерацией на каждом k -м цикле вычислений $\alpha_{CBj} = 1 - j\Delta\alpha_{CB}$ ($j = 1, 2, \dots, \Delta\alpha_{CB} > 0$). Поскольку $\alpha_{CBj+1} < \alpha_{CBj}$, то с увеличением j значение P_{kj} приближается к P^* . При достижении равенства $P_{kj} = P^*$ фиксируются соответствующие $\alpha_{HBk}^* = \alpha_{HB}^*$ и $\alpha_{CBj}^* = \alpha_{CB}^*$. Процесс заканчивается на цикле, где уже на первой итерации $P_{k1} = P^*$, поскольку α_{CB}^* на $(k + 1)$ -м цикле, очевидно, больше, чем на k -м. Внутри области, ограниченной кривой $P_k = P_k(\alpha_{HB}^*, \alpha_{CB}^*)$ и осями координат, $P_k < P^*$, вне ее (до прямой $\alpha_{CB} = 1$) $P_k > P^*$.

Существенно упростить вычислительные процедуры можно в частных решениях задач, учитывая особенности конструкции и орбиты конкретного КА и находя компромисс между объемом и точностью вычислений [9]. Проиллюстрируем это на примере разработанного ГП КБ «Южное» КА АУОС-СМ. Последняя из двух его модификаций запущена в 2001 г. на орбиту, близкую к круговой, со средней высотой 525 км и наклонением 82.5°. Внешний вид модификации КА АУОС-СМ показан на рис. 4 [13]. На освещенном участке орбиты продольная ось КА, перпендикулярная к фотопреобразующей поверхности СЭС, ориентирована на Солнце с высокой точностью, благодаря чему величина N_{CH} на его протяжении практически постоянна. Полагая также $t_i = t_Z$, $\Delta\tau_i = T_{0Z}$, где $T_{0Z} = T_0(t_Z)$ — период обращения КА, $T_0(t_Z + \Delta t_C) = T_0(t_Z) = T_{0Z}$, поскольку $\Delta t_C \ll T_A$, получим из (1) при $\alpha_C(t) = \alpha_{CB} = \text{const}$ и $\alpha_H(t) = \alpha_{HB} = \text{const}$

$$\begin{aligned}\Delta e_{xz} &= e_x(t_z + T_{0z}) - e_x(t_z) = \\ &= \alpha_{CB} N_{CH}(t_z) \int_{t_z}^{t_z + T_{0z}} \Gamma(t) \gamma(t) dt - \alpha_{HB} \bar{N}_{HH} T_{0z},\end{aligned}$$

где Δe_{xz} — изменение e_x за виток при энергетическом дисбалансе с параметрами α_{CB} , α_{HB} , \bar{N}_{HH} — средневитковая мощность нагрузки в штатном режиме. Если $e_x(t_z + T_{0z}) < e_x(t_z)$, оперативный энергетический запас СЭС на данном витке уменьшается. В этом случае $\gamma(t) = 1$ согласно (2) и

$$|\Delta e_{xz}| = |T_{0z}(\alpha_{CB} N_{CH}(t_z) \tau_c(t_z) - \alpha_{HB} \bar{N}_{HH})|, \quad (4)$$

где

$$\tau_c(t_z) = \frac{1}{T_{0z}} \int_{t_z}^{t_z + T_{0z}} \Gamma(t) dt$$

— относительная продолжительность освещенной части витка.

На каждом витке оперативный энергозапас СЭС сокращается на величину $|\Delta e_{xz}|$, и через $m = \frac{e_x(t_z) - e_{xmn}}{|\Delta e_{xz}|}$ витков снижается до критического уровня.

Для круговых орбит [8]

$$\tau_c(t) = 0.5 + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{(R+h)\sin\nu(t)}, \quad (5)$$

где $\nu(t)$ — угол между нормалью к плоскости орбиты и направлением на Солнце, h — высота орбиты, R — средний радиус Земли.

Максимальное значение τ_c равно 1, минимальное соответствует $\nu = 90^\circ$.

В выражении для m есть три параметра (N_{CH} , e_x , τ_c), являющиеся функциями случайной величины t_z . Используя некоторые допущения, можно избежать статистических процедур их определения. Значения N_{CH} и e_x находятся в диапазонах $N_{CH}(T_A) \leq N_{CH} \leq N_{CH}(0)$, $e_{xps} \leq e_x \leq e_{xmn}$, где e_{xps} — минимально возможный энергозапас СЭС на витке в штатном режиме работы КА, поэтому, полагая $N_{CH}(t_z) = N_{CH}(T_A) = N_{CHA}$ и $e_x(t_z) = e_{xps}$, получим для m оценку снизу. Функция распределения τ_c в течение T_A может быть получена путем применения формулы (5) к функции распределения угла ν при произвольном времени запуска КА. Веро-

ятность того, что в период нештатного функционирования КА значение ν будет лежать в диапазоне $\pm \Delta\nu$ относительно ν^* , равна [3]:

$$\begin{aligned}P(\nu^* - \Delta\nu \leq \nu < \nu^* + \Delta\nu) &= \\ &= \frac{\Delta T_\Sigma(\nu^* - \Delta\nu \leq \nu < \nu^* + \Delta\nu)}{T_A},\end{aligned}$$

где $\Delta T_\Sigma(\nu^* - \Delta\nu \leq \nu < \nu^* + \Delta\nu)$ — суммарная за T_A продолжительность полета КА в диапазоне углов от $\nu^* - \Delta\nu$ до $\nu^* + \Delta\nu$, определяемая по результатам баллистического моделирования полета.

На рис. 5 приведена зависимость $P(N_{CHA}\tau_c \geq \bar{N}_{CHA})$ от \bar{N}_{CHA} , построенная по данным $N_{CHA}\tau_c$ в функции ν для КА АУОС-СМ [15] и зависимости $\nu(t)$ для орбиты КА с параметрами, аналогичными орбите КА АУОС-СМ [16]. Так как $\Delta t_c = m T_A$, то из выражения для m , принимая $\Delta t_c = \Delta t_*^*$, находим

$$|\Delta e_{xz}| = \frac{(e_{xps} - e_{xmn})T_{0z}}{\Delta t_*^*},$$

с учетом чего из (4) следует

$$\begin{aligned}\bar{N}_{CHA} &= N_{CHA}\tau_c = \\ &= \frac{1}{\alpha_{CB}} \left(\alpha_{HB} \bar{N}_{HH} - \frac{e_{xps} - e_{xmn}}{\Delta t_*^*} \right),\end{aligned} \quad (6)$$

где \bar{N}_{CHA} — минимальная величина $N_{CHA}\tau_c$, необходимая для обеспечения $\Delta t_c = \Delta t_*^*$.

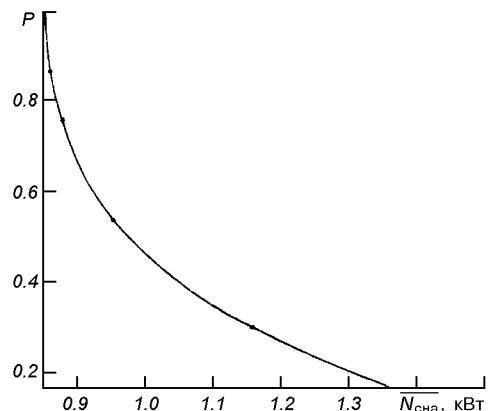


Рис. 5. Зависимость $P(N_{CHA}\tau_c \geq \bar{N}_{CHA})$ от \bar{N}_{CHA} .

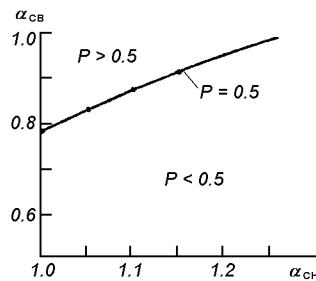


Рис. 6. Линия равной вероятности

По полученному значению \bar{N}_{CHA} из графика на рис. 5 находится искомая вероятность $P(N_{CHA}\tau_c \geq \bar{N}_{CHA})$.

Например, при увеличении энергопотребления нагрузки на 20 % ($\alpha_{HB} = 1.2$, $\alpha_{CB} = 1$) и $e_{xps} - e_{xmn} = 1120$ Вт·ч, $\bar{N}_{HH} = 850$ Вт вероятность энергообеспечения КА в течение 12 ч составляет 59 %. Вариация Δt^* , особенно в сторону сокращения, заметно влияет на $P(N_{CHA}\tau_c \geq \bar{N}_{CHA})$. Увеличение Δt^* до 18 ч ведет к снижению вероятности до 53 %, а уменьшение до 8 ч — к возрастанию до 76 %. При фиксированном Δt^* удовлетворить некоторой заданной вероятности P^* можно изменением функциональных параметров СЭС $B(t)$, в частности N_{CH} и e_{xms} .

Для ограничения области энергетического дисбаланса, отвечающей нормированной величине P^* , из графика на рис. 5 находится значение \bar{N}_{CHA} при $P(N_{CHA}\tau_c \geq \bar{N}_{CHA}) = P^*$, равенство которому должно обеспечиваться в выражении (6) при варьировании α_{CB} и α_{HB} . На рис. 6 приведена линия равной вероятности ($P^* = 0.5$) при $\Delta t^* = 12$ ч. Она показывает, что работоспособность КА может быть энергетически обеспечена в течение 12 ч с вероятностью не менее 50 % в нештатных ситуациях, характеризующихся сочетанием изменений энергетики СЭС и энергопотребления нагрузки в диапазонах от 1 до 0.784 и от 1.26 до 1 соответственно.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. В зависимости от конкретного сочетания внешних условий, параметров СЭС и энергопотребностей нагрузки возможно электроэнергетическое обеспечение КА в нештатном режиме на время, необходимое для оценки ситуации и осуществления восстановливающих действий, а

в некоторых случаях и ограниченное, или даже полное выполнение плановой программы полета КА.

2. Если известны время возникновения нештатной ситуации, степень нарушения энергобаланса и состояние оперативного энергозапаса СЭС, то энергообеспечение КА на требуемом промежутке времени рассчитывается с использованием детерминированных процедур по алгоритму, представленному в работе.

3. Если вышеуказанные факторы не конкретизированы, то в силу их случайной природы может быть оценена возможность электроэнергетического обеспечения КА в нештатном режиме как вероятность того, что энергетически обеспеченный промежуток времени нештатного функционирования КА будет не менее какой-то критической величины, по алгоритму на основе процедуры статистических испытаний, также разработанному в работе.

В качестве перспективного направления развития разрабатываемой проблемы следует отметить создание методического аппарата оптимизации проектных параметров СЭС при заданной вероятности электроэнергетического обеспечения КА в нештатных режимах.

- Белов Д. Г. Формирование полетной программы работы космического аппарата при наличии электроэнергетических ограничений // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 120—126.
- Белов Д. Г. Вероятностная оценка электроэнергетического обеспечения космического аппарата // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 4.—С. 37—42.
- Белов Д. Г. Электроэнергетическое обеспечение живучести космического аппарата при нарушении ориентации солнечной батареи // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 4.—С. 20—23.
- Белов Д. Г. Оценка и моделирование энергетической живучести космического аппарата // Космическая техника. Ракетное вооружение: Научно-техн. сб. — Днепропетровск: ГКБ «Южное», 2006.—Вып. 1-2.—С. 159—167.
- Бордина Н. М., Васильев А. М., Далецкий Г. С., Ландсман А. П. Определение потока прямой солнечной радиации, поступающей на солнечную батарею // Космич. исслед.—1970.—8, вып. 3.—С. 453—457.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990.—37 с.
- Дедков В. К., Северцев Н. А., Куонджич С. М. Обеспечение живучести сложных технических систем космических средств // 3-я Междунар. научно-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Тез. докл. — Рязань, 2000.—С. 68—70.

8. Инженерный справочник по космической технике / Под общ. ред. А. В. Солодова. — М.: Воениздат, 1969.—693 с.
9. Колин К. К., Липаев В. В. Проектирование алгоритмов управляющих ЦВМ. — М.: Сов. радио, 1970.—344 с.
10. Конюхов С. Н., Федякин А. И. Вероятностно-статистические методы проектирования систем космической техники. — Днепропетровск: ИТМ НАНУ и НКАУ, 1997.—250 с.
11. Латайко П. А. Текущая и интегральная освещенность Солнцем поверхностей спутника, ориентированного на Землю // Космич. исслед.—1969.—7, вып. 3.—С. 450—454.
12. Никифоров В. Анализ энергетических возможностей системы электроснабжения при нештатных режимах работы микроспутника // Тр. 3-й Междунар. конф.-выставки «Малые спутники: новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке.» — Королев, 2002.—Кн. 1.—С. 300—304.
13. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» / Под общ. ред. С. Н. Конюхова. — Киев: Изд-во Компания «КИТ», 2004.—260 с.
14. Снаплев Ю. М., Старосельский В. А. Моделирование и управление в сложных системах / Под ред. Н. П. Бусленко. — М.: Сов. радио, 1974.—264 с.
15. Belov D. G. Electric Power System for the Solar Satellite // 45th Congress of the International Astronautical Federation. AIAA Preprint IAF—94—R.3.381. — Jerusalem, Israel, 1994.—3 p.
16. Belov D. G., Dranovsky V. J., Perecopsky I. T. Electric Power Ensuring Small Satellite Board Equipment // 46th Congress of the International Astronautical Federation. AIAA Preprint IAF—95—IAA.11.2.09. — Oslo, Norway, 1995.—5 p.

**THE INFLUENCE OF ELECTRIC ENERGY
DISBALANCES ON THE SPACECRAFT
FUNCTIONABILITY UNDER NON-STANDARD MODES**

D. G. Belov

The problem of energy disbalances under non-normal spacecraft function is analysed. The indexes for numeral estimation of the electric power supply of SC functionality are determined. The procedure and algorithms for the calculation are developed. Using SC AUOS-SM as an example, the practical application of the procedure developed to investigate the influence of energy deficit on the spacecraft fail-safe concept is illustrated.

УДК 536.3:681.586.5

Г. Ф. Горностаев

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, Київ

Волоконно-оптические датчики уноса теплозащиты

Надійшла до редакції 22.06.07

Представлено результати розробки, випробувань і застосування (при стендових дослідженнях теплозахисних матеріалів) світловодних датчиків лінійного виносу теплозахисту. Описано конструкції датчиків, призначених для НПО «Енергія» і КБ «Новатор» (Росія) та методику вимірювань на них. Розроблено технологію виготовлення керамічного наконечника, оснащеного світловодними датчиками виносу. Датчики випробовувалися для параметрів: $P_e = 0.04...11$ МПа, $T_e = 1100...5000$ К, $q = 1.6...42$ МВт/м², $V_y = 0.2...2$ мм/с, $T_w = 600...2400$ К.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения экспериментальных данных об изменении толщины теплозащитного покрытия головной части космического аппарата (КА) при входе в плотные слои атмосферы КА снабжаются датчиками уноса теплозащиты [5, 6]. Эти датчики используются также при стендовой отработке новых теплозащитных материалов.

Ниже представлены результаты наших разработок, испытаний и применения при стендовых испытаниях волоконно-оптических датчиков (ДУМ) уноса теплозащитного материала (ТЗМ), что является актуальной задачей совершенствования измерительных средств экспериментальной обработки ТЗМ для объектов космической техники (КТ) при летных и стендовых испытаниях. Подробно излагается методика измерений и анализ погрешности при применении ДУМ [3].

Достоверность и новизна подтверждается стендовыми испытаниями с моделированием реальных полетных тепловых и аэродинамических нагрузок на ТЗМ, в результате которых получена более высокая точность контроля уноса ТЗМ из различных материалов, чем при применении других типов датчиков ДУМ (ультразвуковых,

радиоактивных и др.) [5, 6]. Это позволяет получить более достоверные результаты при летных и стендовых испытаниях ТЗМ, что в итоге позволит повысить надежность объектов КТ.

Практическая ценность приведенных материалов подтверждается использованием разработанных датчиков при испытаниях ТЗМ на ведущих предприятиях космических отраслей Украины и России.

Разработка датчиков выполнялась по заказам КБ «Южное», а также предприятий Российской Федерации: НПО «Энергия», ЦКБМ, МИТ, НИИ ТП, КБ «Новатор».

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «МАРС-5» (НПО «ЭНЕРГИЯ»)

Световоды из плавленого кварца Ø 1 мм вклеивались в отверстия Ø 1.1 мм (рис. 1). Фотоголовка с фотоприемниками СФЗ-1 крепилась к образцу снизу на центрирующих штырях. Термостабилизация фотоприемников осуществляется с помощью $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, имеющего температуру плавления 30 °C и удельную теплоту плавления $r = 0.29$ МДж/кг. Термостабилизация

способствует сохранению уровня собственных шумов и постоянных времени, которые зависят от температуры чувствительного слоя фотоприемника. В высокотемпературных материалах (АСД, СТКТ-11, ТЗМКТ-8, СТКТ-НА) устанавливались кварцевые световоды, а в низкосублимирующих материалах (ТП-41К, ТТПС-15)

— стеклянные. В каждом образце было установлено по четыре световода на различном расстоянии от обогреваемой поверхности материала.

Разработка методики измерений. Для определения момента выхода верхнего торца световода на разрушаемую поверхность проведено специальное исследование. Было установлено по два световода: один световод — сквозной, другой — «внутренний», его входной торец расположен на известном расстоянии h от нагреваемой поверхности ТЗМ. Результаты испытаний таких датчиков на газодинамическом стенде свидетельствуют о том, что характер изменения световых потоков на выходе указанных световодов не зависит от режима нагрева ($q = 6.7 \dots 17.6 \text{ МВт/м}^2$). Световой поток от «внутреннего» световода J_{bc} плавно увеличивается и достигает уровня потока J_{cc} от сквозного световода, а затем стабилизируется на этом уровне:

$$J_{cc} - J_{bc} \rightarrow 0, \text{ если } h \rightarrow 0.$$

Таким образом, значение фотосопротивления R_{cp} , соответствующее моменту выхода торца «внутреннего» световода на разрушаемую поверхность ТЗМ, можно оценить по величине фотосопротивления, расположенного под сквозным световодом (табл. 1).

Рис. 1. Датчик уноса для НПО «Энергия»: 1 — пленка родия на торце световода, 2 — ТЗМ ТТПС-15, 3 — световод, 4 — крышка, 5 — место вальцовки, 6 — текстолитовая втулка, 7 — металлический корпус, 8 — фотоприемник, 9 — полость с $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 10 — центрирующий штырь

Таблица 1. Значения измерения R_{cp} датчиков со сквозными световодами на стендах конвективного и радиационного нагрева

Стенд	Условия нагрева			ТЗМ	R_{cp} , кОм	Материал и длина световода
	q , МВт/м^2	P_e , МПа	$T_{e'}$, К			
Газогенератор	0.9	1.05	1100	ТТПС-15	16.0	Стекло, $L = 40$ мм
	1.2	1.06	1200		6.5	
	3.3	1.1	1500		4.0	
	9.2	—	—		1.3	
СГУ-4	0.9	1.05	1100	ТП-41 К	14.0	Стекло, $L = 40$ мм
	1.2	1.06	1200		6.0	
	3.3	1.1	1500		3.3	
«Уран»	5	—	—	ТП-41 К	2.0	Стекло, $L = 40$ мм
	6	—	—		1.0	
	7	—	—		0.5	
Газогенератор	5.5	1.3	1800	АСД	2.6	Кварц, $L = 40$ мм
	10	1.9	2500		1.0	
	17.6	3.5	3100		0.70	
Газогенератор	5.5	1.3	1800	СТКТ-11	—	Кварц, $L = 40$ мм
	10	1.9	2500		—	
	17.6	3.5	3100		—	
«Уран»	6.3	—	—	—	0.35	—
Газогенератор	42	110	3100	Ниасит	0.70	Кварц, $L = 190$ мм

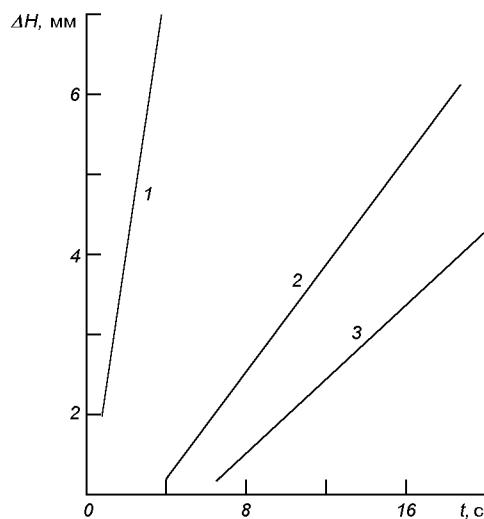


Рис. 2. Значения уноса ΔH для высокотемпературных ТЗМ, полученные на различных газодинамических стендах с помощью волоконно-оптических датчиков: 1 — ТЗМ КТ-8, $q = 27 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 1.8 \text{ МПа}$, $T_e = 5500 \text{ К}$; 2 — ТЗМ АСД, $q = 7.6 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 0.17 \text{ МПа}$, $T_e = 2300 \text{ К}$; 3 — ТЗМ УП-УТ-П, $q = 12 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 0.23 \text{ МПа}$, $T_e = 2600 \text{ К}$

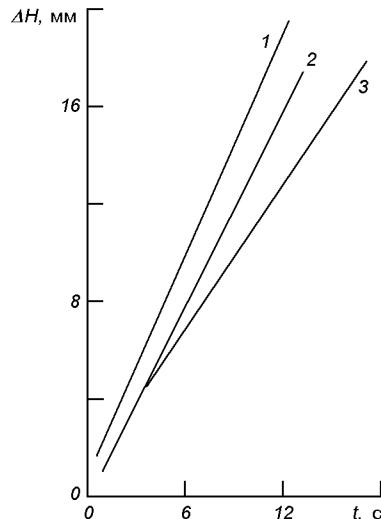


Рис. 3. Значения уноса ΔH для низкосублимирующих ТЗМ, полученные на различных газодинамических стендах с помощью волоконно-оптических датчиков: 1 — ТЗМ ТП-41К, $q = 3.3 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 0.11 \text{ МПа}$, $T_e = 1500 \text{ К}$; 2 — ТЗМ ТППС-15, $q = 3.3 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 0.11 \text{ МПа}$, $T_e = 1500 \text{ К}$; 3 — фторопласт-4, $q = 12 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $P_e = 0.23 \text{ МПа}$, $T_e = 2600 \text{ К}$

Это обстоятельство значительно сократило продолжительность стендового эксперимента по определению величины R_{cp} для различных классов ТЗМ и режимов их нагрева.

Считая, что момент стабилизации сигнала внутреннего световода соответствует выходу его торца на разрушающую поверхность материала по показаниям датчиков построены графики линейного уноса различных ТЗМ (рис. 2, 3). Световоды не оказывают влияние на разрушение поверхности ТЗМ.

Анализ погрешностей. Чтобы исключить влияние проникающего через полупрозрачный слой ТЗМ внешнего радиационного потока на точность измерения уноса, входные торцы и часть боковой поверхности световодов были покрыты светозащитной пленкой родия, обладающего отличными отражательными, механическими свойствами и термостойкостью. После отжига в аргоне при температуре 970 К пленка Rh уплотняется до толщины 4...7 мкм.

Для оценки времени разрушения (уноса) пленки родия были проведены испытания датчиков со сквозными светозащищенными световода-

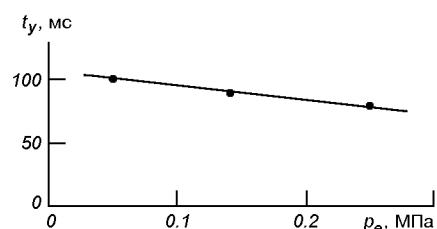


Рис. 4. Время t_y уноса пленки родия на торце световода в зависимости от давления торможения P_e струи газогенератора (ТЗМ СТКТ-11)

ми на газодинамическом стенде. Фиксировалось время t_y , через которое происходило срабатывание регистрирующего порогового триггерного блока (ПСД-10). Результаты испытаний (рис. 4) свидетельствуют о том, что срабатывание ПСД-10 при соответствующем данному тепловому потоку пороговом значении фотосопротивления R_{cp} происходило не позже, чем через 0.1 с после начала нагрева. Источником светового сигнала являлось внешнее излучение, которое воздейст-

вовало на фотоприемник после уноса пленки родия.

Надежность работы датчиков оценивалась по количеству непоследовательных («ложных») срабатываний единичных датчиков по отношению к их общему числу (20 для каждого из ТЗМ). При «шаге» заделки торцов световодов 1 мм практически во всех испытанных образцах срабатывание дискретных единичных датчиков происходило последовательно, т. е. в том порядке, в котором располагались торцы световодов относительно нагреваемой поверхности ТЗМ. Высокая надежность срабатывания ДУМ при вклейивании «пробки» с датчиками в отверстие на теплозащите подтверждена испытаниями датчиков из ТЗМ ТП-41К и ТТПС-15 в струях двух газогенераторов с параметрами: 1) $q = 3 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.2 \text{ МПа}$, $T_e = 6800 \text{ К}$; 2) $q = 1.6 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 40 \text{ кПа}$, $T_e = 3000 \text{ К}$.

Флуктуация светового сигнала на выходе сквозного световода вносит некоторую неопределенность в выбор величины R_{cp} . При значении R_{cp} , равном среднему значению величины сопротивления фотоприемника $R_{\text{фп}} [J_{\text{cc}}(h = 0)]$, ошибка δR_{cp} составляет (по результатам экспериментов на газодинамическом стенде) для материалов ТП-41 К, СТКТ-11, ТТПС-15, АСД не более 3 % ($q \leq 17.6 \text{ МВт/м}^2$).

Погрешность, обусловленная конечной шириной зоны переброса преобразователя сигнала датчика ПСД-10, срабатывающего при $R_{\text{фп}} = R_{\text{cp}}$, составляет 3 %. Существенная доля в погрешности измерения линейного уноса ТЗМ дискрет-

ным ДУМ принадлежит точности заделки торцов световодов на заданном расстоянии от нагреваемой поверхности ТЗМ. Погрешность рентген-контроля координат торцов световодов, покрытых пленкой Rh, составила 0.4 мм.

На газодинамическом стенде ИПМ НАНУ погрешность дискретного ДУМ определялась по следующей методике. В момент срабатывания блока ПСД-10 его выходной сигнал (6 В) через реле включал пневмоэлектроклапан двойного действия, который управляет системой ввода-вывода державки из струи. После вывода образца с датчиком из струи проводился линейный замер образца. Ошибка δH определения толщины унесенного слоя ТЗМ единичным датчиком оценивалась по средней скорости V_y уноса ТЗМ путем сравнения начальной и конечной (после прекращения нагрева) длины световода (L_h и L_k):

$$\delta H = V_y \Delta t_u - (L_h - L_k), \quad (1)$$

где Δt_u — инерционность системы ввода-вывода державки.

В реальной ситуации на стенде всегда соблюдается неравенство $1 \text{ с} \geq t_u > 0$. Параметр $V_y \Delta t_u$ равен толщине унесенного слоя ТЗМ после срабатывания блока ПСД-10. Если $\Delta t_u = 0$, тогда $\delta H = -(L_h - L_k)$. При $L_h > L_k$ срабатывание блока ПСД-10 произошло после выхода торца световода на уносимую поверхность ТЗМ, т. е. $\Delta H < 0$, а при $L_h = L_k$ погрешность $\delta H = 0$. В случае, когда срабатывание блока ПСД-10 произошло до выхода торца световода на уносимую поверхность ТЗМ (при $\Delta t_u = 0$) вместо формулы (1)

Таблица 2. Значения уноса ТЗМ и погрешность срабатывания датчиков на газодинамических стенах различных предприятий

Предприятие	Режим нагрева			ТЗМ	V_y , мм/с	$ \Delta H $, мм
	q , МВт/м^2	P_e , МПа	T_e , К			
ИПМ НАНУ	3.3	0.11	1500	ТП-41К	1.3	0.4
	3.3	0.11	1500	ТТПС-15	1.1	0.4
	6.7	0.15	2200	АСД	0.32	0.5
	7.6	0.17	2300	АСД	0.36	0.5
	12.0	0.23	2600	УП-УТ-П	0.2	0.8
	17.6	0.35	3100	АСД	0.48	0.5
НПО «Энергия» (Россия)	1.6	0.04	3000	ТП-41К	0.5	0.4
	1.6	0.04	3000	ТТПС-15	0.4	0.4
НИИ ТП (Россия)	27	1.8	5000	ТЗМ КТ-8	2.0	0.5
Боткинский машзавод (Россия)	42	11	3100	Ниасит	0.98	0.5

пользуются сравнением результатов линейного замера образца после испытаний с известной длиной световода L_h .

В табл. 2 представлены результаты измерений уноса и погрешность датчиков.

ДАТЧИКИ ДЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (НИИ ТП, ЦКБМ)

На газодинамической установке предприятия НИИ ТП (Россия) были проведены измерения уноса материала ТЗМ КТ-8. Параллельный контроль за величиной уноса материала осуществлялся с помощью киносъемки (1 кадр в секунду). Условия испытания были следующими:

$$q = 27 \text{ МВт/м}^2, P_e = 1.8 \text{ МПа}, T_e = 5500 \text{ К.}$$

Результаты обработки данных киносъемки свидетельствуют, что кварцевые световоды и ТЗМ уносятся с одинаковой скоростью, световоды не влияют на разрушение нагреваемой поверхности, погрешность измерения линейного уноса материала датчиками равна 0.5 мм (рис. 2, табл. 2).

По заказу ЦКБМ для изделий этого предприятия была разработана оригинальная технология [4] изготовления штатного наконечника из объемного стеклопластика трехмерного плетения марки «Куб», оснащенного волоконно-оптическими ДУМ с диаметром кварцевого волокна 0.1 мм. Технология изготовления наконечника основана на предприятии НИИ СПВ (РФ). Датчики устанавливаются в материал наконечника в процессе его формования.

ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «СТРЕЛА-2» (КБ «НОВАТОР»)

Известна технология [2] изготовления деталей управляемых снарядов с использованием кварцевого стекла.

По заказу КБ «Новатор» были разработаны конструкция и технология изготовления наконечника из кварцевой керамики (ниасита), оснащенного волоконно-оптическими ДУМ в процессе формования теплозащиты [4]. Технологический процесс формования наконечника вместе с кварцевыми световодами ($\varnothing 1\ldots1.2$ мм) включает следующие операции:

- формование;
- сушка и обжиг, механическая обработка, сборка.

Наконечник со световодами представляет собой конус, внутри которого расположены 10 световодов длиной 170–185 мм и установочный световод длиной 15 мм. По торцу изделия ОТИ-2252 световоды расположены по окружности на одинаковом расстоянии друг от друга. В вершине конуса все световоды находятся на разной высоте и разном расстоянии от поверхности наконечника; место расположения торца световода, покрытого пленкой родия, обусловлено длиной световода и углом наклона к оси конуса. Набор заготовки происходит путем осаждения шлифера на гипсовую поверхность формы, полностью повторяющую наружную поверхность заготовки. Затем форма для наконечника разбирается, а заготовка подсушивается, дает небольшую усадку и легко выходит из формы. Диэлектрические свойства армированной световодами кварцевой керамики определялись на установке «Кварц» и составили при комнатной температуре: диэлектрическая проницаемость 3.34...3.39; тангенс угла диэлектрических потерь не более 5, что соответствует значениям этих параметров для неармированной керамики. С увеличением температуры до 1473 К величина диэлектрической проницаемости увеличивается до 3.54, а тангенс угла диэлектрических потерь — до 105. Результаты рентген-контроля свидетельствуют об отсутствии дефектов структуры материала наконечника и о его монолитности. В табл. 3 приведены результаты измерений физических свойств наконечника со световодами.

Таблица 3. Результаты измерения физических свойств ниасита, армированного кварцевыми световодами $\varnothing 1.2$ мм

Плотность, г/см ³	Прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость, Н·м/см ²	Модуль упругости, кг/мм ²	Запас прочности изделия	Разрушающее усилие, Н
1.91—2.0	51—65	11.27—18.13	3580—3730	1.22—1.66	5490—7350

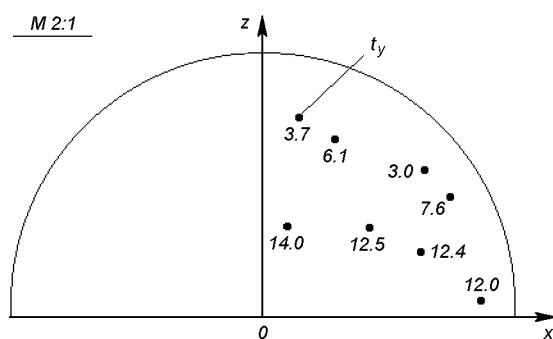


Рис. 5. Расположение торцов световодов, покрытых пленкой родия, и время t_y срабатывания соответствующего датчика (z , x — ось и радиус наконечника)

Втулка с фотоприемниками наглухо посажена на металлический «палец». Распайка СФЗ-1 на экранированный электрический кабель, расположенный внутри пальца, изолирована и залита эпоксидной смолой. С целью защиты чувствительной поверхности фотоприемника от проникающего через керамику внешнего излучения, нижняя торцевая поверхность наконечника вокруг световодов была зачернена графитом.

На газодинамическом стенде РМ-2 предприятия Воткинский машзавод (Россия) с помощью датчиков были получены данные по уносу керамического наконечника в следующих условиях нагрева: $P_e = 11$ МПа, $T_e = 3100$ К, $q = 42$ МВт/м².

Результаты обработки данных по уносу наконечника, полученных с помощью восьми дискретных датчиков, представлены на рис. 5, где координаты расположения входных торцов световодов условно сведены в одну плоскость и размещены по одну сторону от оси конуса. Рядом с координатой указано время срабатывания соответствующего датчика.

Данные киносъемки свидетельствуют, что точность измерения линейного уноса датчиками составила 0.5 мм (табл. 2). Нет влияния кварцевых световодов на разрушение материала (ниасита) в местах установки датчиков.

На изделиях предприятия КБ «Новатор» (Россия) используются кварцевые наконечники из ниасита следующей конструкции: высота конуса — 190 мм; радиус затупления носка — 20 мм.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция дискретного ДУМ для полупрозрачных ТЗМ, которая обеспечивает его работоспособность независимо от оптических свойств ТЗМ и наличия химически активного углерода в коксовом слое материала. Сравнительно низкая теплопроводность световодов делает незначительными перетечки тепла по датчику вглубь ТЗМ.

Точность контроля уноса высокотемпературных ТЗМ волоконно-оптическим ДУМ (табл. 2) превосходит точность ультразвукового (1.27 мм) и радиоактивного (2.8 мм) датчиков, в углепластике его точность 0.8 мм превосходит точность термопарного датчика (1.5 мм), а в стеклопластике он дает вдвое меньшую ошибку (0.5 мм), чем радиотехнический ДУМ (1.0 мм). В сублимирующем ТЗМ волоконно-оптический ДУМ позволяет контролировать унос с точностью 0.4 мм и практически не имеет конкурентов.

По сумме рассмотренных признаков волоконно-оптические ДУМ являются наиболее предпочтительными при исследовании кварцевой керамики, сублимирующих ТЗМ, асбо-, стекло- и, по-видимому, углепластика.

2. Впервые создано рабочее средство для контроля уноса наконечника из кварцевой керамики, которое практически идеально сочетается с материалом изделия. Технология изготовления наконечника с ДУМ позволяет сохранить основные свойства (структурную, целостность, прочность, радиопрозрачность, плотность) изделия, увеличить его ударную вязкость. Выходной сигнал датчика уноса легко согласуется с измерительной системой борта. Технологический процесс изготовления наконечника с ДУМ освоен в опытном производстве предприятия НПО «Технология» (РФ); наконечники признаны годными для комплектации изделия 63Т6 предприятия КБ «Новатор» (РФ).

3. Результаты стендовых испытаний дискретных ДУМ при конвективном нагреве в ИПМ НАНУ, Воткинском машзаводе (РФ), НИИ ТП (РФ), НПО «Энергия» (РФ) свидетельствуют, что волоконно-оптические датчики позволяют измерять унос широкого класса теплозащитных материалов и не оказывают существенного влияния на разрушение исследуемых ТЗМ. В результате применения датчиков при стендовых

испытаниях получены данные о скорости уноса различных классов теплозащитных материалов.

1. А. с. 236516 СССР. МКИ² Г О1 N 25/38. Оптоэлектронный преобразователь термоэррозии материала / Г. Ф. Горностаев, И. Н. Францевич, В. С. Дверняков и др.; Заявл. 05.05.86; Опубл. 00.00.86, Бюл. № 6.
2. Валтон Д. Применение кварцевого стекла для изготовления деталей управляемых снарядов // Век керамики (США).—1960.—№ 10.—С. 33—37.
3. Горностаев Г. Ф. Волоконно-оптические датчики и перспективы их использования в космической программе Украины // Космічна наука і технологія // 1996.—2, № 3-4.—С. 88—94.
4. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Метод измерения лучистой составляющей теплового потока на поверхности керамической теплозащиты // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 98—102.
5. Грабовский В. Р. Приборно-измерительное оборудование спускаемых аппаратов // Экспресс-информ. Астронавтика и ракетодинамика.—1983.—№ 8.—С. 11—21.

6. Слезингер И. И. Аппаратура для испытаний носовых частей баллистических ракет при входе в плотные слои атмосферы // Экспресс-информ. Испытательные приборы и стенды.—1978.—№ 23.—С. 17—31.

OPTICAL FIBER SENSORS FOR HEAT-PROTECTION ABLATION

G. F. Gornostaeve

We present some results of the development, tests and application (by the stand investigation of HIM) of optical fiber sensors of heat-insulation materials linear ablation. The methods for measuring and the design of the sensors for the NPO «Energiia» and KB «Novator» (Russia) are described. The technology for manufacturing the ceramic tip equipped with optical fiber ablation sensors is developed. The range of the measurement of the parameters of the sensors which were tested is: $P_e = 0.04...11 \text{ MPa}$, $T_e = 1100...5000 \text{ K}$, $q = 1.6...42 \text{ MW/m}^2$, $V_y = 0.2...2 \text{ mm/s}$, $T_w = 600...2400 \text{ K}$.

Rekha Agarwal Mishra¹, Rajesh K. Mishra²

¹Department of Physics, Govt. Model Science College (Autonomous), Jabalpur (M. P.) 482 001, India

²Computer and IT Section, Tropical Forest Research Institute, P. O. RFRC, Mandla Road, Jabalpur (M. P.) 482 021, India

Cosmic ray modulation at neutron monitor energies

Received October 1, 2007

The present work deals with the study of the first three harmonics of cosmic ray intensity on geo-magnetically quiet days from 1981 to 1993 for the Deep River and Inuvik neutron monitoring stations having mid and low cutoff rigidity. The amplitude of the first harmonic remains high for Deep River having mid cutoff rigidity as compared to the Inuvik neutron monitor having low cutoff rigidity on quiet days. The diurnal amplitude significantly decreases and phase shifts towards an earlier time during solar activity minimum years at both Deep River and Inuvik. The amplitude of the second harmonic significantly enhanced during solar activity minimum as well as maximum at Deep River and remains low during solar activity maximum at Inuvik, whereas the phase shifts towards an earlier time during solar maximum for both the stations. The amplitude of the third harmonic significantly enhanced during solar activity minimum at Deep River and during solar activity minimum at Inuvik, whereas the phase does not show any significant characteristics and fluctuates quite frequently. The amplitude of semi/tri-diurnal anisotropy has a good positive correlation, while the others (i.e., amplitude and phase) have a very weak correlation with solar wind velocity on quiet days at the Deep River station during 1981—1993. The solar wind velocity significantly remains in the range from 350 to 425 km/s, i.e., it is nearly average on quiet days. The amplitude and direction of the anisotropy on quiet days depend only weakly on high-speed solar wind streams for the two neutron monitoring stations of mid and low cutoff rigidity threshold. The amplitude as well as direction of the second harmonic has a good anti-correlation with interplanetary magnetic field B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at the Deep River station. The direction of the second and third harmonics has a good anti-correlation with interplanetary magnetic field B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at Inuvik station.

INTRODUCTION

Cosmic ray anisotropic variations and their characteristics are studied through the diurnal and semi-diurnal components mainly and the level of the isotropic intensity provides fingerprint for identifying the modulating process and the electromagnetic state of interplanetary space in the neighbourhood of the Earth. Many workers attempted to derived relationship between the mean daily variation and the level of solar and geomagnetic activity [57]. Yearly average values of the first harmonic of solar daily variation experience strong changes from year to year and with the

cycle of solar activity. Amplitude and phase of diurnal anisotropy change with solar activity cycles [4, 18, 54]. Lockwood and Webber [36] found a close relationship between the magnitude and frequency of Forbush decreases and the eleven-year cosmic ray variation. They concluded that the effect of Forbush and other transient decreases is the dominant factor in the long-term intensity modulation. Forbush [19] showed that annual means of the CR diurnal anisotropy resulted from the addition of two distinct components. One, W has its maximum in an asymptotic direction of 128° E of the Sun and is well approximated by a wave W with a period of two solar cycles and the

other component V has its maximum in an asymptotic direction of 90° E of the Sun. Ahluwalia [3] reported that diurnal anisotropy is unidirectional during 1957—1970 with the direction along 1800 hr LT (east—west) and during 1971—1979 it consisted of two components; one is in the east—west direction and the other is the radial component with the direction along 1200 hr LT. Sabbah et al. [52] characterized the diurnal anisotropy by two components. Only one anisotropy is dominant during each magnetic state of the solar cycle. The direction of the dominant anisotropy vector points towards the 1800 hr LT direction during the negative state of the solar cycle and toward earlier hours during the positive state. Ballif et al. [10] correlated K_p and A_p with the mean fluctuations in amplitude of IMF, which in turn is related to diffusive component of convection-diffusion theory. A_p is also found to be related with solar wind velocity, which is related to the convective component of convection-diffusion theory. Agrawal [2] and Bieber and Evenson [12] preferred to investigate the daily variation in cosmic ray intensity on the long/short term basis performing the analysis for all days in a year; whereas, Kumar et al. [33, 35] have studied long/short term daily variation on geomagnetically 60 quiet days (QD). Jadhav et al. [25] and Kumar et al. [32] studied daily variation during days of low and high amplitude anisotropic wave trains. Sabbah [49] calculated the diurnal variation for days with high, intermediate and low interplanetary magnetic field (IMF) magnitude.

A special type of consecutive days having abnormally high or low amplitudes in the daily variation of cosmic rays was reported several times earlier with an explanation of sources and sinks in anti-garden-hose and garden-hose directions [25, 46, 56]. The existence of anisotropic wave trains of high and low amplitude was revealed through the long-term study of cosmic ray intensity. Periods of unusually large amplitude often occur in trains of several days. The average characteristics of cosmic ray diurnal anisotropy are adequately explained by the co-rotational concept [8, 9, 43]. This concept supports the mean diurnal amplitude in space of 0.4 % along the 1800 hr direction using the worldwide neutron monitor data. However, the observed day-to-day variation both in amplitude and time of maximum, and the abnormally large

amplitudes or abnormally low amplitudes of consecutive days, cannot be explained in co-rotational terms. Moreover, the maximum intensity of diurnal anisotropy has not appeared in a direction of 1800 hr, which is the nominal co-rotational phase [38, 45].

The average daily variation of cosmic ray intensity generally consists of diurnal variation, semi-diurnal variation and tri-diurnal variation. The amplitude of the diurnal variation at a high / middle latitude station was found to be of the order of 0.3 to 0.4 %, whereas the amplitudes of two higher harmonics are of the order of 0.02 % and 0.08 %, respectively [44]. The average characteristics were found to vary with solar cycle as well, where the variation is much larger at higher energies.

A number of investigators reported the short-term characteristics of the daily variation, where they selected continually occurring days of high and low amplitudes of diurnal variation [1, 55, 56]. These results have pointed out significant departures in the time of maximum as well as their association with higher harmonics.

Many workers [28, 42, 46] used a new concept for the interpretation of the diurnal variation. McCracken et al. [39] first suggested the extension of this new concept from the solar cosmic events to the observed diurnal variation and theoretical formulation was provided by Forman and Gleeson [20]. Several workers have attempted to find the possible origin of the «large amplitude wave trains» of cosmic ray neutron intensity to develop a suitable realistic theoretical model which can explain the diurnal anisotropy on individual days.

Hashim and Thambyahpillai [22] and Rao et al. [46] showed that the enhanced diurnal variation of large amplitude events exhibits a maximum intensity in space around the anti-garden-hose direction (2100 hr) and a minimum intensity in space around the garden-hose direction (0900 hr). Kane [27] and Bussoletti [15] have noticed that quite often an enhanced intensity is presented along the corotational direction and it is not correlated with the garden-hose direction.

The diurnal anisotropy is well understood in terms of a convective-diffusive mechanism [20]. Mavromichalaki [37] observed that the enhanced diurnal variation was caused by a source around 1600 hr or by a sink at about 0400 hr. It was

pointed out that this diurnal variation was caused by the superposition of convection and field-aligned diffusion due to an enhanced density gradient of 8 % AU⁻.

Analysis of Data. The amplitude and phase of the harmonics of the daily variation in cosmic ray intensity are derived by Fourier analysis [16], by noting the hourly counting rate of the observed cosmic ray intensity over a period of 24 hr.

The Fourier analysis yields reliable measures of the amplitude and phase on a day-to-day basis, provided the time series is reasonably stationary. However, this method cannot estimate the amplitude of the ambient anisotropy, which, for small amplitudes, contributes to large uncertainties in the Fourier coefficients.

Harmonic Analysis. Time dependent harmonic function $F(t)$ with 24 equidistant points in the interval from $t = 0$ to $t = 2\pi$ can be expressed in terms of the Fourier series:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{24} (a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)),$$

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{24} r_n \cos(nt - \varphi_n).$$

Here a_0 is the mean value of $F(t)$ for the time interval from $t = 0$ to 2π and a_n , b_n are the coefficients of n^{th} harmonics; they can be expressed as follows:

$$a_0 = \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{24} r_i,$$

$$a_n = \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{24} r_i \cos nt,$$

$$b_n = \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{24} r_i \sin nt.$$

The amplitude r_n and phase φ_n of the n^{th} harmonic are expressed as

$$r_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}$$

and

$$\varphi_n = \tan^{-1} [a_n/b_n].$$

The daily variation of the cosmic ray intensity can be adequately represented by the superposition of the first, second, third and fourth harmonics as follows:

$$F(t) = a_1 \cos t + b_1 \sin t + a_2 \cos 2t + b_2 \sin 2t + a_3 \cos 3t + b_3 \sin 3t + a_4 \cos 4t + b_4 \sin 4t.$$

Trend Correction. The daily variation in cosmic ray intensity is not strictly periodic. Thus, if the number to be analysed represents bi-hourly (or hourly) means of cosmic ray intensity, the mean for hour t_0 (0^{th} hour) will not, in general, be the same as the mean for hour t_{24} (or 24^{th} hour). This difference on account of secular changes, is allowed for in practice by applying a correction known as trend correction, to each of the terms.

If y_0 is the value of the ordinate at $x = 0$ (0^{th} hour) and y_{12} is the value of the ordinate at $x = 2\pi$ (24^{th} hour), the trend correction value for any hour is given by the equation

$$\bar{y}_k = y_k \frac{(\pm \delta_y \times k)}{12},$$

where $k = 0, 1, 2, \dots, 12$, y_k is uncorrected value, $\pm \delta_y$ denotes secular changes, i. e., $\pm \delta_y = y_{12} - y_0$.

Mode of Analysis. The pressure corrected data of the Deep River (vertical cutoff rigidity = 1.02 GV, geog. latitude = 46.1° N, geog. longitude = 282.5° E) and Inuvik (vertical cutoff rigidity = 0.18 GV, geog. latitude = 68.35° N, geog. longitude = 226.27° E) Neutron Monitor (NM) stations were subjected to the Fourier analysis for the period 1981–1993 after applying the trend correction. While performing the analysis of the data all the days having more than three continuous hourly data missing are discarded.

Criteria for selection of 60 Quiet Days. Days on which the transient magnetic variations are regular and smooth are said to be magnetically quiet or calm or Q days. These are the days with low values of A_p and K_p . According to solar geophysical data (SGD) five quietest days in a month, i. e., 60 Q days in a year are selected. These days are called the International quiet-quiet-days or QQ days. Kumar et al. [33, 34] studied long/short term daily variation on geomagnetically 60 QD. The 60 QD are better suited for long/short term studies of daily variation. The distribution of phase and amplitude for 60 QD are more regular and some of the variations are observed more clearly [31].

RESULTS AND DISCUSSION

The study of the anisotropy of galactic cosmic ray intensity is an essential tool as it is expected to carry important information on the origin and the propagation mechanism of the galactic cosmic rays. Numerous studies are concentrated on the diurnal variation of cosmic ray intensity [6, 7, 13, 30, 40].

Annual average values of the amplitude of the first three harmonics of daily variation in cosmic ray intensity along with statistical error bars on 60 quiet days are plotted for two different neutron monitoring stations, Deep River with middle cutoff rigidity (1.02 GV) and Inuvik with low cutoff rigidity (0.18 GV) in Fig. 1, *a*—*c*. One can clearly see from the plots that the amplitude of the first harmonic (A_1) remains high for Deep River as compared to the Inuvik neutron monitor having low cutoff rigidity throughout the period of investiga-

tion except for the year 1991. The amplitude is found to remain low (~ 0.2 %) showing dips during the years 1983, 1987, and 1991, whereas it remains high (~ 0.4 %) showing peaks during 1985 and 1989 at Deep River. The amplitude A_1 remains low (~ 0.2 %) showing dips during 1983, 1986, and 1992, whereas it remains high (~ 0.4 %) showing peaks during 1985 and 1992 at the Inuvik station. Thus the diurnal amplitude A_1 significantly decreases during 1986—1987, i. e., solar activity minimum years at both Deep River and Inuvik. It is also noticed from the shape of the plots that A_1 at both the stations is positively correlated during 1981—1990, whereas they are anti-correlated from 1990 onwards with each other.

The semi-diurnal amplitude A_2 as depicted in Fig. 1, *b* increases gradually from 1981 and reaches its maximum (0.1 %) during 1984 and

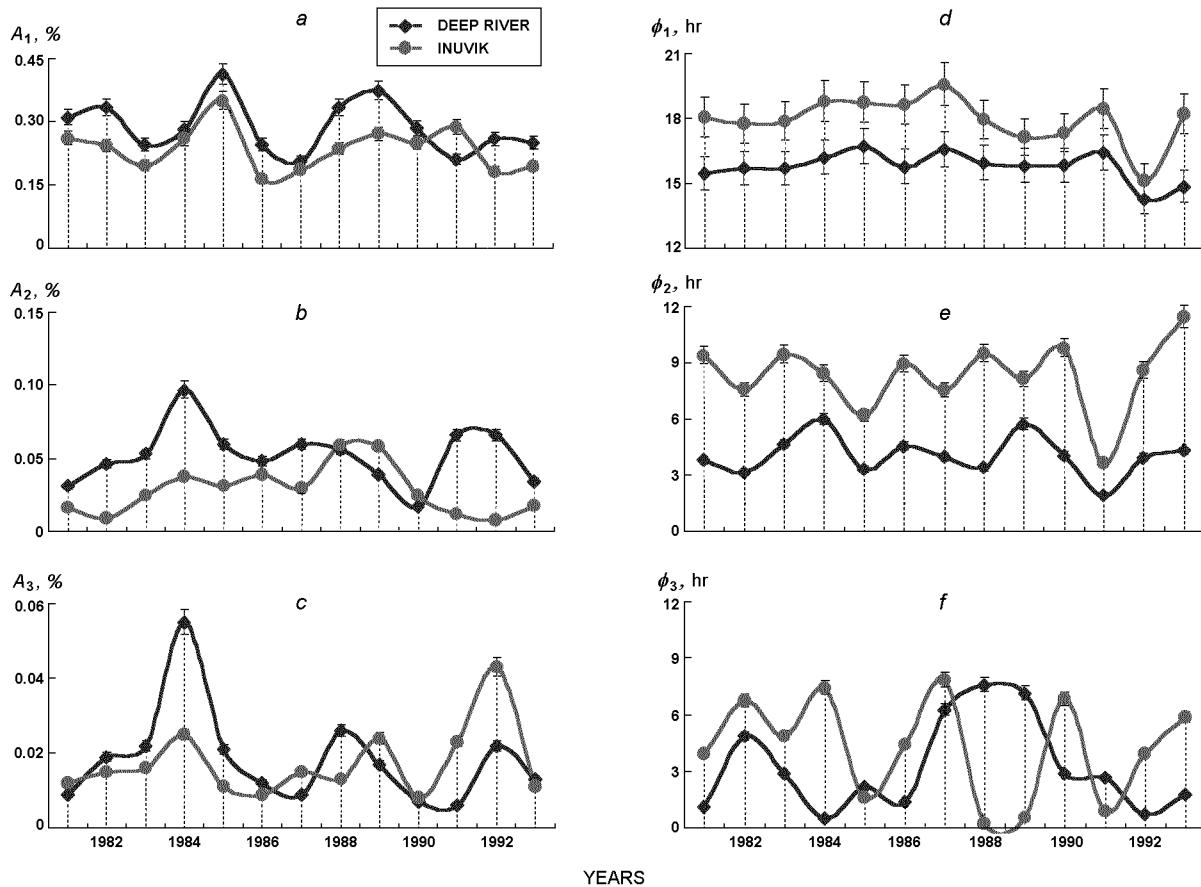


Fig. 1. Average values of the amplitude (*a*, *b*, *c*) and phase (*d*, *e*, *f*) of first three harmonics of daily variation in cosmic ray intensity along with statistical error bars on 60 QD for the Deep River and Inuvik NM stations

then decreases up to 1990 at Deep River. However A_2 increases gradually from 1982 with some fluctuations and reaches its maximum (0.06 %) during 1988 and then decreases sharply up to 1992 at Inuvik. The semi-diurnal amplitude A_2 significantly enhanced during 1984 (solar activity minimum) and 1991–1992 (solar activity maximum) at Deep River, whereas A_2 significantly remains low during 1991–1992 (solar activity maximum) at Inuvik. The semidiurnal amplitude A_2 is anti-correlated for the two stations during the years 1991–1992 as amplitude reaches its maximum for one station and minimum for the other during the same year.

The tri-diurnal amplitude A_3 , as depicted in Fig. 1, *c* increases sharply from 1981 and reaches its first maximum during 1984 at both the stations having different cutoff rigidity. Then it decreases gradually and the second peak occurs in 1988 at Deep River and in 1989 at Inuvik. A_3 decreases sharply from 1988 to 1991 then increases and reaches its third maximum during 1992, whereas at Inuvik A_3 starts increasing from 1990 and reaches its third maximum in 1992. The amplitude A_3 significantly enhanced at Deep River during 1984 (solar activity minimum) and at Inuvik during 1992 (solar activity maximum). It is also noticed from the shape of the plots that the amplitude A_3 is positively correlated with each other for the two stations with different cutoff rigidity during the period of investigation.

Fig. 1, *d–f* gives annual average values of the time of maximum (hr) for the first three harmonics of daily variation in cosmic ray intensity on 60 quiet days along with statistical error bars for two different neutron monitoring stations Deep River and Inuvik. It is clear that the time of maximum (phase) φ_1 of diurnal anisotropy shifts towards an earlier time at Inuvik as compared to the phase at Deep River throughout the period of investigation. The phase φ_1 significantly shifts towards an earlier time during 1992 (solar activity maximum) at both the stations. The time of maximum at both the stations seems to be positively correlated with each other during the entire period. To confirm these trends further we also calculated the correlation coefficient between these two phases and found a significant positive correlation ($r = 0.77 \%$). The phase φ_1 remains along the corotational direction

(18 hr) at Inuvik and shifts towards earlier hours as compared to corotational direction at Deep River for the majority of the years.

The time of maximum of semi-diurnal anisotropy φ_2 significantly fluctuates during 1981–1990 and significantly shifts towards an earlier time during 1991 (solar activity maximum) and then shifts towards later hours from 1992 onwards at Inuvik. The phase φ_2 reaches its maximum (~ 06 hr) during 1980 and 1989 and its minimum (~ 02 hr) during 1991 at the Deep River station. It is also noteworthy that the time of maximum significantly shifts towards an earlier time at the Deep River station as compared to the time of maximum at the Inuvik station throughout the period. It is also observed that the time of maximum φ_2 changes quite frequently from higher to lower values at Deep River throughout the period. The phase φ_2 significantly shifts towards an earlier time during 1991 (solar activity maximum) at both the stations with different cutoff rigidity. The time of maximum at both the stations seems to be positively correlated with each other during the entire period. To obtain a further confirmation these of trends we also calculated the correlation coefficient between these two phases and found a good positive correlation ($r = 0.52 \%$).

The time of maximum φ_3 of tri-diurnal anisotropy reaches its maximum (~ 07 hr) in 1982, 1984, 1987, 1990 showing peaks during these years and its minimum during 1985, 1988–1989, 1991 showing dips during these years at the Inuvik station. Alternatively, the phase φ_3 reaches its maximum in 1982, 1987–1989 showing peaks during these years and it reaches its minimum (~ 0.50 hr) in 1980, 1984 showing dips during these years. As seen from the figure it is also noteworthy that the time of maximum for these two stations is found to be positively correlated during 1981–1987 and anti-correlated for the period 1988–1993. To confirm these trends further, we have also calculated the correlation coefficient between these two phases and found a good positive correlation ($r = 0.46$) for 1981–1987 and a high anti-correlation ($r = -0.69$) during 1988–1993.

Solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) play an important role in controlling the electrodynamics of the heliosphere [18]. Solar wind speed, V , and some IMF parameters, such as

vector \mathbf{B} , spiral angle and tilt are important for the transport of energetic cosmic ray particles in the heliosphere, for the modulation of cosmic ray and generation of cosmic ray anisotropy in the interplanetary space. The solar wind velocity determines two components of the cosmic ray modulation mechanism: the convection and the adiabatic energy changes. The high velocity solar wind fluxes associated with coronal holes give rise to both isotropic and anisotropic variations in cosmic ray intensity [24, 26]. Changes of the solar wind velocity near the Earth may have not only local but also global character [53, 47]. Kondoh et al. [29] found that the peak solar wind velocity has good anti-correlation with the high-energy galactic cosmic ray intensity. The IMF magnitude and fluctuations are responsible for the depression of cosmic ray intensity during high-speed solar wind events [50]. The IMF magnitude reaches the highest value during declining phase of solar activity [48]. The correlation between cosmic ray intensity and solar wind velocity is statistically significant, especially in the period of the maximum solar activity. The regression coefficients obtained on yearly basis depend on sunspot number and are ~ -0.8 and ~ -0.2 per 100 km/s at the solar maximum and minimum, respectively [21]. The relation of cosmic ray intensity to solar wind velocity is, in general, dependent on physical conditions in the interplanetary space varying with the solar activity. The year-to-year variation of the effect of solar wind upon cosmic ray intensity is dependent on solar activity and the decrement of cosmic ray intensity due to the variation of solar wind velocity is proportional to sunspot number [21].

To find a possible dependence of amplitude and time of maximum on solar wind and IMF, we have plotted the scatter diagram between amplitude/phase and solar wind velocity (V), north — south component of IMF (B_z), the product ($V \times B_z$) for the two neutron monitoring stations.

Fig. 2, *a*—*c* shows the amplitude (%) and phase (hr) of cosmic ray diurnal/semi-diurnal/tri-diurnal anisotropy along with the variation in associated value of solar wind velocity (V) on quiet days and the regression line for Deep River during 1981—1993. The amplitude A_1 slightly decreases as the solar wind velocity increases and shows a very weak negative correlation ($r = -0.04$). The phase ϕ_1 significantly remains in a direction earlier

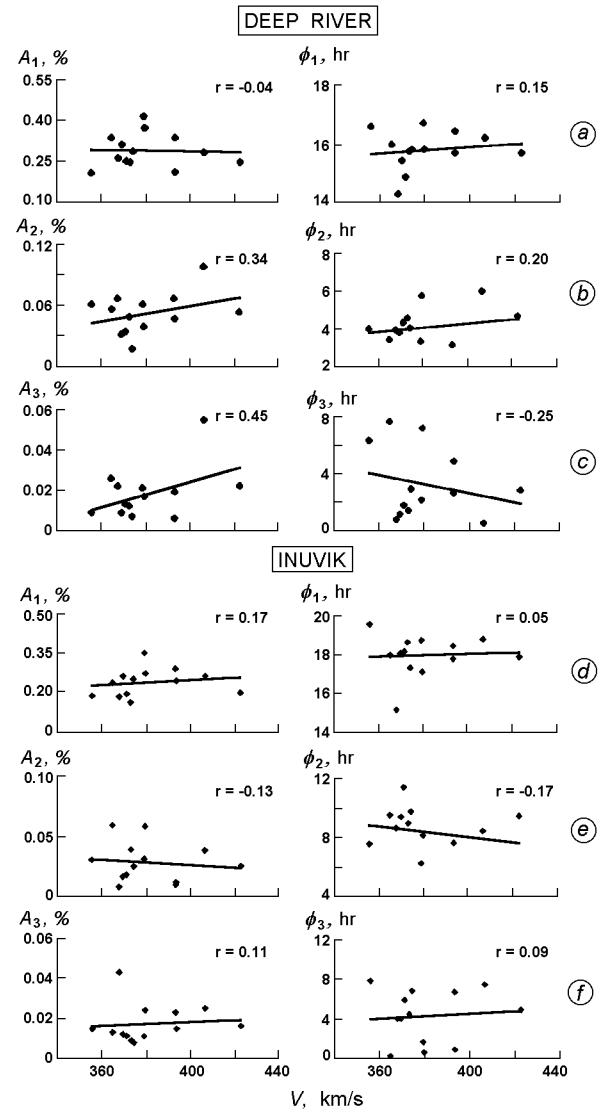


Fig. 2. Amplitude and phase of the diurnal, semi-diurnal and tri-diurnal anisotropy on quiet days along with solar wind velocity, regression line and correlation coefficient r during 1981—1993: *a*, *b*, *c* — at the Deep River station; *d*, *e*, *f* — at the Inuvik station

than co-rotational/18-hr direction and slightly shifts to later time with the increase of solar wind velocity and shows a weak correlation ($r = 0.15$) as depicted in Fig. 2, *a*. The amplitude A_2 of semi-diurnal anisotropy increases with the increase of solar wind velocity and shows a good positive correlation ($r = 0.34$). The direction of the semi-

diurnal anisotropy φ_2 is observed to shift towards earlier hours with the decrease of solar wind velocity and shows some positive correlation ($r = 0.20$) as depicted in Fig. 2, *b*. The amplitude A_3 of tri-diurnal anisotropy on quiet days is observed to increase with the increase of solar wind velocity and shows positive correlation ($r = 0.45$). The phase φ_3 of the tri-diurnal anisotropy shifts towards an earlier time with increase of V and shows some anti-correlation ($r = -0.25$) with V as depicted in Fig 2, *c*. Thus, from the investigations described above we may infer that only the amplitude of semi/tri-diurnal anisotropy have a good positive correlation, while the others (amplitude and phase) have a very weak correlation with solar wind velocity on quiet days at the Deep River station during 1981—1993. It is also observed from these plots that the solar wind velocity significantly remains in the range from 350 to 425 km/s, i.e., being nearly average on quiet days.

Fig. 2, *d—f* gives the amplitude (%) and phase (hr) of cosmic ray diurnal/semi-diurnal/tri-diurnal anisotropy along with the variation in associated value of solar wind velocity (V) and the regression line for Inuvik on quiet days during 1981—1993. As depicted in Fig. 2, *d* the amplitude A_1 of the diurnal anisotropy is found to increase slightly as the solar wind velocity increases and shows some positive correlation ($r = 0.17$). The phase φ_1 is found to remain along the co-rotational/18-hr direction and slightly shifts to later time with the increase of solar wind velocity and shows a weak correlation ($r = 0.05$) as depicted in Fig. 2, *d*. The amplitude A_2 of semi-diurnal anisotropy slightly decreases with the increase of solar wind velocity and shows a weak correlation ($r = -0.13$). The direction of the semi-diurnal anisotropy φ_2 is observed to shifts towards earlier hours with the increase of solar wind velocity and shows a weak anti-correlation ($r = -0.17$) as depicted in the Fig. 2, *e*. The amplitude A_3 of tri-diurnal anisotropy on quiet days is observed to increase slightly with the increase of solar wind velocity and shows a weak correlation ($r = 0.11$). The phase φ_3 of the tri-diurnal anisotropy is found to shift slightly towards later hours with the increase of solar wind velocity and shows a weak correlation ($r = 0.09$) with V as depicted in Fig. 2, *f*. Thus

from the investigations described above we may infer that neither the amplitude nor the direction of all the three harmonics have any significant trend associated with solar wind velocity on quiet days at the Inuvik station with low cutoff rigidity during 1981—1993. It is also observed from these plots that the solar wind velocity significantly remains in the range from 350 to 425 km/s, i.e., being nearly average on quiet days.

Usually, the velocity of high-speed solar wind streams (HSSWSs) is 700 km/s [41]. Therefore, it may be deduced from these plots that the amplitude as well as direction of the first three harmonics on quiet days do not depend on the HSSWS or by the sources on the Sun responsible for producing the HSSWS such as polar coronal holes (PCH) etc. Thus, we can infer that the amplitude and direction of the anisotropy on quiet days are weakly dependent on HSSWSs for the two neutron monitoring stations of mid and low cutoff rigidity threshold, which is in agreement with earlier findings [41] and significantly contradicts with the earlier results reported by Iucci et al. [23] and Dorman et al. [17] that the solar diurnal amplitude is enhanced during the HSSWSs coming from coronal holes. According to Ahluwalia and Riker [5], there is no relation between solar wind speed and diurnal variation in high rigidity region. The modulation of solar diurnal anisotropy is weakly or less dependent on the solar wind velocity [41].

We have also plotted the scattered diagram (plots are not shown here) for the amplitude (%) and phase (hr) of cosmic ray diurnal/semi-diurnal/tri-diurnal anisotropy along with the variation in associated value of north south component of IMF (B_z), the product ($V \times B_z$) and calculated the correlation coefficient between them on quiet days for the Deep River and Inuvik stations. We observed that the semi-diurnal amplitude A_2 have a good anti-correlation with B_z ($r = -0.40$) and the product $V \times B_z$ ($r = -0.35$) at Deep River. The time of maximum of the second harmonic φ_2 also shows a good anti-correlation with both B_z ($r = -0.48$) and $V \times B_z$ ($r = -0.45$) at Deep River. The other components (amplitude and phase) shows a very weak correlation with B_z and $V \times B_z$.

Alternatively, the amplitude of the first harmonic A_1 shows some positive correlation with the

north — south component B_z ($r = 0.36$) and the product $V \times B_z$ ($r = 0.36$) at Inuvik. The time of maximum of the second and third harmonics (φ_2 , φ_3) shows a good anti-correlation with the north — south component B_z ($r = -0.62$, -0.46) and the product $V \times B_z$ ($r = -0.63$, -0.44) at Inuvik, while the remaining parameters (i.e., amplitude and phase) do not show any significant characteristics associated with B_z and $V \times B_z$ on quiet days. Thus, from the above findings we may infer that the amplitude as well as direction of the second harmonic have a good anti-correlation with IMF B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at the Deep River station. However, the direction of the second and third harmonics has a good anti-correlation with IMF B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at the Inuvik station.

Sabbah [49] obtained an inverse correlation between cosmic ray intensity and the geomagnetic activity and observed the enhancement in upper cutoff rigidity, R_c and the geomagnetic activity resulting from variation in the solar plasma parameters. Upper cutoff rigidity correlates well with the product VB rather than with magnetic field B since VB reflects both diffusion by the IMF and convection with solar wind. The product VB is more important for cosmic rays and geomagnetic activity modulation rather than IMF alone. The amplitude of 27-day variation of GCR is also linearly correlated with the IMF strength B , the z -component B_z of the IMF vector and the product VB [51]. Burlaga and Ness [14] argued that it is ultimately the strong magnetic field and their associated fluctuations that produce the modulation of cosmic rays. Coupling between the IMF strength B and the CR transport parameters leads to a simple modulation model in which the modulation process is linked to global variations of B . Belov [11] suggested that the local value of the IMF played a significant role in controlling the GCR modulation at an observing site.

CONCLUSIONS

On the basis of the above investigations the following important conclusions may be drawn:

1. The amplitude of the first harmonic remains high for Deep River having mid cutoff rigidity as

compared to the Inuvik neutron monitor having low cutoff rigidity on quiet days. The diurnal amplitude significantly decreases and phase shifts towards an earlier time during solar activity minimum years at both Deep River and Inuvik.

2. The amplitude of the second harmonic significantly enhanced during solar activity minimum as well as maximum at Deep River and remains low during solar activity maximum at Inuvik, whereas the phase shifts towards an earlier time during solar maximum for both the stations.

3. The amplitude of the third harmonic significantly enhanced during solar activity minimum at Deep River and during solar activity minimum at Inuvik, whereas the phase does not show any significant characteristics and fluctuates quite frequently.

4. The amplitude of semi/tri-diurnal anisotropy has a good positive correlation, while the others (i.e., amplitude and phase) have a very weak correlation with solar wind velocity on quiet days at Deep River.

5. The amplitude and direction of the anisotropy on quiet days are weakly dependent on high-speed solar wind streams for two neutron monitoring stations with mid and low cutoff rigidity threshold.

6. The amplitude as well as direction of the second harmonic has a good anti-correlation with IMF B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at the Deep River station. However, the direction of the second and third harmonic has a good anti-correlation with IMF B_z and the product $V \times B_z$ on quiet days at the Inuvik station.

Additional studies can make a contribution to understanding the results reported here and help to use this information for the elaboration of models of solar modulation. Studies of correlations between the CR intensity and IMF/SWP parameter(s) should be useful for identifying the parameter(s) controlling the amplitude of the intensity modulation. Besides, it is of interest to determine how the correlation slopes depend on the time scale over which the data are averaged since the spatial extent of the structures in the heliosphere that control the modulation on short time scales must be smaller than those producing long term effects.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are indebted to various experimental groups, in particular, Prof. Margaret D. Wilson, Prof. K. Nagashima, Miss. Aoi Inoue and Prof. J. H. King for providing the data. We also acknowledge the use of NSSDC OMNI database and NGDC geophysical data.

REFERENCES

1. Agrawal S. P., Ananth A. G., Bemalkhedkar M. M., Kargathra L. V., Rao U. R. High-energy cosmic ray intensity increase of non-solar origin and the unusual Forbush decrease of August 1972 // *J. Geophys. Res.* — 1974. — **79**. — P. 2269—2280.
2. Agrawal S. P., Pathak S. P., Mishra B. L. // *18th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1983. — **3**. — P. 304—307.
3. Ahluwalia H. S. Is there a twenty-year wave in the diurnal anisotropy of cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.* — 1988. — **15**. — P. 287—290.
4. Ahluwalia H. S., Fikani M. M. // *25th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1997. — **2**. — P. 125—128.
5. Ahluwalia H. S., Riker J. F. Secular changes in the upper cut-off rigidity of the solar diurnal anisotropy // *Planet. Space Sci.* — 1987. — **35**. — P. 39—43.
6. Alania M. V., Iskra K., Modzelewska R., Siluszyk M. The Galactic Cosmic Ray Intensity and Anisotropy Variations for Different Ascending and Descending Epochs of Solar Activity // *29th Int. Cosmic Ray Conf.* — 2005. — **2**. — P. 219—222.
7. Amenomori M., et al. Two-dimensional observations on TeV Cosmic-ray large scale anisotropy using the Tibet Air Shower Array // *29th Int. Cosmic Ray Conf.* — 2005. — **2**. — P. 49—52.
8. Axford W. I. The modulation of galactic cosmic rays in the interplanetary medium // *Planet. Space Sci.* — 1965. — **13**. — P. 115.
9. Axford W. I. Anisotropic diffusion of solar cosmic rays // *Planet. Space Sci.* — 1965. — **13**. — P. 1301.
10. Ballif J. R., Jones D. E., Coleman P. J. Further evidence on the correlation between transverse fluctuations in the interplanetary magnetic field and K_p // *J. Geophys. Res.* — 1969. — **74**. — P. 2289—2301.
11. Belov A. V., Guschina R. T., Yanke V. G. On Connection of Cosmic Ray Long Term Variations with Solar-Heliospheric Parameters // *26th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1999. — **7**. — P. 175—178.
12. Bieber J. W., Evenson P. // *25th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1997. — **2**. — P. 81—84.
13. Braun J. Engler, Horandel J. R., Milke J. Solar modulation of cosmic rays in the energy range from 10 to 20 GeV // *29th Int. Cosmic Ray Conf.* — 2005. — **2**. — P. 135—138.
14. Burlaga L. F., Ness N. F. Magnetic field strength distributions and spectra in the heliosphere and their significance for cosmic ray modulation: Voyager 1, 1980—1994 // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103**. — P. 29719—29732.
15. Bussolletti E., Eldo-Celes/Estro-Cers Scient // *Techn. Rev.* — 1973. — **5**. — P. 285.
16. Chapman S., Bartels // *Geomagnetic II*. — Oxford: Univ. Press, 1940.
17. Dorman L. I., Kaminer N. S., Kuj'micheva A. E., Mymrina N. V. Features of diurnal variations of cosmic rays in high-speed streams of the solar wind // *Geomagn. and Aero.* — 1984. — **24**. — P. 546—551.
18. El-Borie M. A., Sabbah I., Darwish A., Bishara A. // *24th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1995. — **4**. — P. 603—606.
19. Forbush Schott E. Cosmic ray diurnal anisotropy 1937—1972 // *J. Geophys. Res.* — 1979. — **78**. — P. 7933—7941.
20. Forman M. A., Gleeson L. J. Cosmic ray streaming and anisotropies // *Astrophys. Space Sci.* — 1975. — **32**. — P. 74—94.
21. Fujimoto K., Kojimatt K., Munakami K. Cosmic Ray Intensity Variations and Solar Wind Velocity // *18th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1983. — **3**. — P. 267—270.
22. Hashim A., Thambyahpillai H. Large amplitude wave trains in the cosmic ray intensity // *Planet. Space Sci.* — 1969. — **17**. — P. 1879—1889.
23. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G. The behavior of the cosmic-ray equatorial anisotropy inside fast solar-wind streams ejected by coronal holes // *Nuovo cim.* — 1983. — **6C**. — P. 145—148.
24. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G. High-speed solar-wind streams and galactic cosmic-ray modulation // *Nuovo cim.* — 1979. — **2C**. — P. 421—438.
25. Jadhav D. K., Shrivastava M., Tiwari A. K., Shrivastava P. K. Study of semi-diurnal variation of cosmic rays during days of high amplitude wave trains // *18th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1983. — **3**. — P. 337—340.
26. Kaminer N. S., Kuzmicheva A. E., Mymrina N. V. Cosmic-ray anisotropy near the boundary of a high-speed solar-wind stream // *Geomagn. and Aero.* — 1981. — **21**. — P. 424—427.
27. Kane R. P. Diurnal anisotropy of cosmic ray intensity // *J. Geophys. Res.* — 1970. — **75**. — P. 4350—4353.
28. Kane R. P. Relationship between interplanetary plasma parameters and geomagnetic Dst // *J. Geophys. Res.* — 1974. — **79**. — P. 64—72.
29. Kondoh K., Hasebe N., Doke T., et al. Galactic Cosmic Ray and Recurrent Enhancement of Solar Wind Velocity // *26th Int. Cosmic Ray Conf.* — 1999. — **7**. — P. 179—182.
30. Kozyarivsky V. A., Lidvansky V. A., Petkov V. B., Tulupova T. I. Mean Diurnal Variations of Cosmic Ray Intensity as Measured by the Baksan Surface and Underground Detectors // *29th Int. Cosmic Ray Conf.* — 2005. — **2**. — P. 93—96.
31. Kumar S., Agarwal R., Mishra R., Dubey S. K. A new concept of analysis of solar daily variation in cosmic ray intensity // *27th Int. Cosmic Ray Conf.* — 2001. — **3**. — P. 3966—3969.
32. Kumar S., Chauhan M. L., Dubey S. K. Effect of interplanetary turbulences causing high/low amplitude anisotropic wave trains in CR intensity // *Sol. Phys.* — 1999. — **176**. — P. 403—415.
33. Kumar S., Gulati U., Khare D., et al. // Study of 22-year periodicity in cosmic ray diurnal anisotropy on quiet days // *J. Pure and Appl. Phys.* — 1993. — **5**. — P. 276—285.
34. Kumar S., Shrivastava S. K., Dubey S. K., et al. Effect of

- solar poloidal magnetic field reversal on diurnal anisotropy of cosmic ray intensity on quiet days // Ind. J. Radio and Space Phys.—1998.—27.—P. 236—240.
35. Kumar S., Yadav R. S. // 17th Int. Cosmic Ray Conf.—1981.—10.—P. 242—245.
36. Lockwood J. A., Webber W. R. Observations of the dynamics of the cosmic ray modulation // J. Geophys. Res.—1984.—89.—P. 17—25.
37. Mavromichalaki H. // Astrophys. Space Sci.—1979.—80.—P. 59.
38. McCracken K. G., Rao U. R. A survey of the diurnal anisotropy // 9th Int. Cosmic Ray Conf.—1965.—1.—P. 213—216.
39. McCracken K. G., Rao U. R., Ness N. F. The inter-relationship of cosmic ray anisotropies and the interplanetary magnetic field // Astron. J.—1968.—73.—P. 70.
40. Moraal H., Caballero-Lopez R. A., McCracken K. G., Humble J. E. An explanation for the unusual cosmic ray diurnal variation in 1954 // 29th Int. Cosmic Ray Conf.—2005.—2.—P. 105—108.
41. Munakata K., Mori S., Ryu J. Y., et al. High-speed solar wind stream and modulation of cosmic ray anisotropy // 20th Int. Cosmic Ray Conf.—1987.—4.—P. 39—42.
42. Owens A. J., Kash M. M. // J. Geophys. Res.—1976.—81.—P. 3471.
43. Parker E. N. Theory of streaming of cosmic rays and the diurnal variation // Planet. Space Sci.—1964.—12.—P. 735.
44. Pomerantz M. A., Agrawal S. P., Potnis V. R. // J. Frank. Inst.—1960.—269.—P. 235.
45. Rao U. R. Solar modulation of galactic cosmic radiation // Space Sci. Rev.—1972.—12.—P. 719.
46. Rao U. R., Ananth A. G., Agrawal S. P. Characteristics of quiet as well as enhanced diurnal anisotropy of cosmic radiation // Planet. Space Sci.—1972.—20.—P. 1799.
47. Richardson I. G., Cane H. V., Wibberenz G. // J. Geophys. Res.—1999.—104.—P. 12549.
48. Sabbah I. // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 2485.
49. Sabbah I. Magnetic cycle dependence of the cosmic ray diurnal anisotropy // Sol. Phys.—1999.—188.—P. 403—417.
50. Sabbah I. The influence of transient solar-wind events on the cosmic-ray intensity modulation // Can. J. Phys.—2000.—78.—P. 293—302.
51. Sabbah I. The role of interplanetary magnetic field and solar wind in modulating both galactic cosmic rays and geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett.—2000.—27, N 13.—P. 1823—1826.
52. Sabbah I., Darwish A. A., Bishara, A. A. Characteristics of two-way cosmic ray diurnal anisotropy // Sol. Phys.—1998.—181.—P. 469-477.
53. Sheeley N. R., Swanson E. T., Wang T. M. // J. Geophys. Res.—1991.—96.—P. 861.
54. Sikripin G. V., Mamrukova V. P. // Izvestia of Russian Acad. Sci., Ser. Phys.—1993.—57, N 7.—P. 51.
55. Tiwari A. K. // 24th Int. Cosmic Ray Conf.—1995.—3.—P. 948—951.
56. Tiwari A. K. // Ph. D. thesis. — A.P.S. University, Rewa, India, 1994.
57. Venkatesan D., Badruddin B. Cosmic ray intensity variations in the 3-dimensional heliosphere // Space Sci. Rev.—1990.—52.—P. 121.
-
- МОДУЛЯЦІЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ
ПРИ ЕНЕРГІЯХ НЕЙТРОННОГО МОНІТОРА**
- Реха Агарвал Мішра, Раджесен К. Мішра*
- Розглянуто результати дослідження перших трьох гармонік інтенсивності космічних променів у геомагнетично спокійні дні за період 1981—1993 рр. для станції нейtronного моніторингу Діп-Рівер та Інувік, які характеризуються середньою і низькою граничною жорсткістю. У спокійні дні амплітуда першої гармоніки залишається високою для нейтронного монітора в Діп-Рівер, який має середню граничну жорсткість, як порівняти з нейтронним монітором станції Інувік, що характеризується низькою граничною жорсткістю. Для обох нейтронних моніторів у роки мінімуму сонячної активності, добова амплітуда істотно зменшується, а фаза зміщується в бік більш ранніх годин. Амплітуда другої гармоніки значно збільшилася під час мінімуму сонячної активності, так як і під час її максимуму, у випадку станції Діп-Рівер і залишається низькою під час максимуму сонячної активності для монітора станції Інувік. Разом з тим, для обох станцій фаза зміщується в бік більш ранніх годин у період сонячного максимуму. Амплітуда третьої гармоніки суттєво зростає під час мінімуму сонячної активності на станціях Діп-Рівер та Інувік, тоді як фаза не показує ніяких істотних властивостей і коливається з досить високою частотою. Амплітуда півдової і третинної анізотропії показує чітку позитивну кореляцію, у той час як амплітуда й фаза дуже слабо корелюють зі швидкістю сонячного вітру в спокійні дні на станції Діп-Рівер протягом 1981—1993 рр. Швидкість сонячного вітру головним чином залишається в межах 350—425 км/с, тобто в спокійні дні має приблизно середнє значення. Для обох станцій нейтронного моніторингу із середнім і низьким порогом граничної жорсткості амплітуда й напрям анізотропії в спокійні дні слабо залежать від високошвидкісних потоків сонячного вітру. Амплітуда, як і напрям, другої гармоніки показує чітку антикореляцію з міжпланетним магнітним полем B_z та з добутком $V \times B_z$ у спокійні дні на станції Діп-Рівер. Разом з тим на станції Інувік напрям другої й третьої гармоніки показує чітку антикореляцію з міжпланетним магнітним полем B_z та добутком $V \times B_z$ у спокійні дні.

УДК 550.385.37:550.388

Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк

Надійшла до редакції 12.11.07

Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1—1000 с, які супроводжували старти 16 ракет з космодрому Плесецьк в 2002—2007 рр. Вимірювання виконано поблизу м. Харкова (віддалення від космодрому 1500 км). Виявлено три групи збурень, що мали запізнення 5—12, 25—40 і 60—85 хв. Їхні тривалості складали 12—20, 40—50 і 42—55 хв відповідно. У геомагнітних пульсаціях переважали періоди 6—8, 10—12 і 10—12 хв відповідно. Амплітуди цих пульсацій досягали 3—5 нТл.

ВВЕДЕНИЕ

Старты и полеты космических аппаратов (КА) относятся к высокоэнергетическим локальным воздействиям на окружающую среду и геокосмос. Эффекты таких воздействий представляют большой интерес для изучения и моделирования динамических процессов в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [20—22]. Старты и полеты КА оказывают тепловое, динамическое, химическое, акустическое и электромагнитное воздействия на среду [1, 2, 8, 14, 17, 20, 22]. В частности, при движении ракеты со сверхзвуковой скоростью генерируется ударная волна, которая, в свою очередь, на больших удалениях превращается в акусто-гравитационную волну (АГВ) [1, 8, 12]. Акусто-гравитационная волна модулирует концентрацию электронов и частоты соударений электронов с тяжелыми частицами в ионосфере. Это приводит к модуляции проводимости плазмы и ионосферного электрического поля. В результате должны возникать геомагнитные пульсации, в частности с теми же периодами, что и у АГВ [11]. Таким образом, ионосферный и магнитный эффекты СР связаны между собой.

Задачами поиска и исследования возмущений, сопутствующих стартам и полетам КА, занимаются уже десятилетия [14, 15, 17, 23, 24, 26, 28]. За это время накоплен большой объем экспериментальных и теоретических данных. Для изучения указанных возмущений применяются как наземные средства наблюдения, так и искусственные спутники Земли. Большинство исследований проводится на близких расстояниях от места воздействия (вдоль траектории полета КА) [1, 16, 17]. Особый интерес представляет изучение эффектов на больших удалениях от места старта. Этому вопросу посвящен ряд наших работ [2—10, 15, 25, 27].

В работе [11] изложены результаты исследования реакции геомагнитного поля на 43 запуска ракет с космодрома Байконур, которые позволили утверждать, что нами впервые обнаружены возмущения геомагнитного поля на удалениях около 2100 км от места старта. Выявлены три группы квазипериодических возмущений с запаздываниями 6—7, 35—45 и 90—130 мин, продолжительностями 17—27, 45—80 и 40—70 мин соответственно. Преобладающие периоды составляли 5—8, 9—11 и 9—11 мин для этих трех типов возмущений. Амплитуды колебаний

варьировались в зависимости от уровня геомагнитной активности и составляли в среднем 3—6 нТл.

Для космодрома Байконур возмущения распространялись практически перпендикулярно к магнитным силовым линиям (в направлении, близком к широтному), в то же время космодром Плесецк расположен в Архангельской области, т. е. при регистрации вблизи г. Харькова направление распространения возмущений является почти долготным. В данном случае удаления от мест стартов сопоставимы: 2100 и 1500 км для Байконура и Плесецка соответственно. Поэтому целесообразно сравнить полученные результаты для обоих космодромов.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдений достаточно высокочастотных (периоды 1—1000 с) вариаций уровня и

спектральных составляющих геомагнитного поля вблизи г. Харькова, которые сопровождали старты 16 ракет различных типов с космодрома Плесецк ($R \approx 1500$ км). Программно-аппаратный измерительный комплекс описан в работе [10]. Методики измерений и анализа изложены в работе [11].

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАКЕТАХ

В работе изучалась реакция геомагнитного поля на старты 16 ракет следующих типов: «Союз» (3 запуска), «Рокот» (5 запусков), «Молния» (1 запуск), «Космос-3М» (7 запусков). Характеристики и основные параметры ракет приведены в табл. 1. Видно, что согласно классификации [15] ракеты «Союз» и «Молния» относятся к

Таблица 1. Краткие сведения о ракетах

Параметры	Тип ракеты			
	«Молния»	«Союз»	«Космос-3М»	«Рокот»
Полная масса, т	305.5	305	109	107.5
Начальная тяга, МН	4.19	4.14	1.48	1.6
Высота, м	40	46.1	32.4	29
Низкоорбитальная полезная нагрузка, кг на 200 км	1800	6855	1500	1950
Нулевая ступень				
Масса, т	43.4	177.6	—	—
Тяга, МН	1	4.08	—	—
Диаметр, м	2.7	2.7	—	—
Высота, м	19	19.6	—	—
Время работы, с	119	120	—	—
Первая ступень				
Масса, т	100.6	105.4	—	77.2
Тяга, МН	1	1	1.74	1.8
Диаметр, м	2.7	3	2.4	2.5
Высота, м	19	27.8	—	13.3
Время работы, с	119	286	170	121
Вторая ступень				
Масса, т	24.8	25.2	—	12.2
Тяга, МН	0.3	0.3	0.16	0.2
Диаметр, м	2.6	2.7	2.8	2.5
Высота, м	2.8	6.7	—	2.9
Время работы, с	241	300	375	155
Третья ступень				
Масса, т	6.7	—	—	5.6
Тяга, МН	0.07	—	—	0.02
Диаметр, м	2.4	—	—	2
Высота, м	3.2	—	—	2.3
Время работы, с	250	—	—	730

Таблица 2. Уровень магнитной возмущенности накануне и в день запуска ракет

Дата	UT	Тип ракеты	2 сут до СР		1 сут до СР		СР	
			A_p	K_p	A_p	K_p	A_p	K_p
20.06.02	09:34	«Рокот»	11	18	16	26	10	22
08.07.02	06:36	«Космос-3М»	23	30	11	25	10	19
29.09.02	15:30	«Космос-3М»	6	16	6	17	8	17
28.11.02	06:07	«Космос-3М»	14	23	21	29	15	24
19.06.03	20:01	«Молния»	50	39	54	40	18	27
19.08.03	10:50	«Космос-3М»	15	21	86	48	21	27
27.09.03	06:12	«Космос-3М»	28	33	17	26	9	18
29.10.03	13:43	«Рокот»	15	22	20	29	189	55
31.05.05	12:00	«Союз»	22	22	67	42	17	26
27.08.05	18:34	«Рокот»	24	29	11	21	7	14
08.01.05	15:02	«Рокот»	4	8	11	18	22	28
03.05.06	17:38	«Союз»	2	4	4	6	3	5
28.07.06	07:05	«Рокот»	6	11	9	12	29	26
19.12.06	14:00	«Космос-3М»	4	6	8	15	14	21
07.06.07	18:00	«Союз»	3	4	2	3	3	6
02.07.07	19:38	«Космос-3М»	6	11	5	11	3	6

тяжелым ракетам, а «Космос» и «Рокот» к ракетам средней тяжести.

УРОВЕНЬ МАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ

Для общего контроля уровня магнитной возмущенности использовались A_p - и K_p -индексы, которые представлены в интернете (табл. 2). Приведены значения индексов в день СР, а также за сутки и двое суток до него. Как видно, старты имели место как в магнитоспокойные, так и в слабомагнитовозмущенные дни. Старт 29 октября 2003 г. совпал с сильнейшей магнитной бурей ($A_p = 189$, $K_p = 9$).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрим старты ракет с космодрома Плесецк в дневное, вечернее и ночное время.

Старты ракет в дневное время. Старт тяжелой ракеты «Союз» произошел 31 мая 2005 г. в 12:00 (здесь и далее UT). Временные вариации горизонтальных составных геомагнитного поля и их вейвлет-спектры приведены на рис. 1, a. Видно, что первое значительное изменение характера колебаний (увеличение амплитуды колебаний от 4 до 10 нТл и от 4 до 6 нТл для H -

и D -компонентов соответственно) наблюдалось через 2—3 мин после момента старта и имело продолжительность 10—15 мин. Второе возмущение регистрировалось с 12:30 до 12:40—12:50 и имело амплитуды 8—10 и 3—4 нТл для H - и D -компонентов соответственно. Следующее изменение характера колебаний началось в 13:00—13:10, сопровождалось увеличением периода примерно в два раза и имело продолжительность 40—50 мин. Амплитуда колебаний составляла около 6 и 4 нТл для H - и D -компонентов соответственно.

Предполагаемые эффекты СР более четко выражены на вейвлет-спектрах для H -компонента.

На рис. 1, б представлены вариации $H(t)$ и $D(t)$, сопутствовавшие старту ракеты средней тяжести «Рокот» 28 июля 2006 г. в 07:05. Заметное увеличение амплитуды (до 10—12 и 6—8 нТл для H - и D -компонентов соответственно) и изменение периода наблюдалось с 07:25 до 08:10. Следующее возмущение началось в 08:30 и продолжалось до 09:20 для обеих компонентов. Периоды волновых процессов составляли 8—10 мин.

Искомые возмущения от СР также лучше проявлялись на вейвлет-спектрах для H -компонента.

Старты ракет в вечернее время. Запуск ракеты средней тяжести «Космос-3М» в 15:30

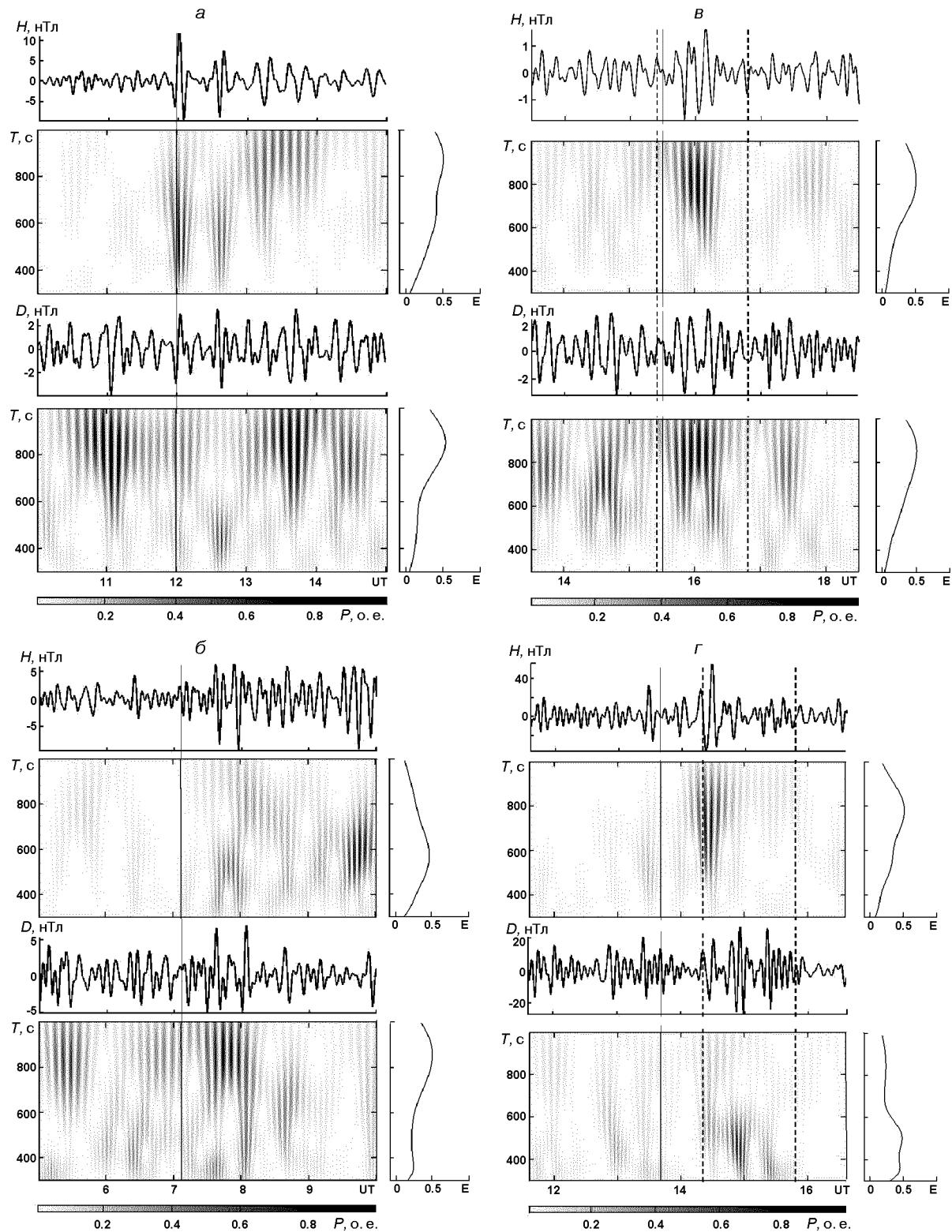


Рис. 1. Окончание см. на с. 33

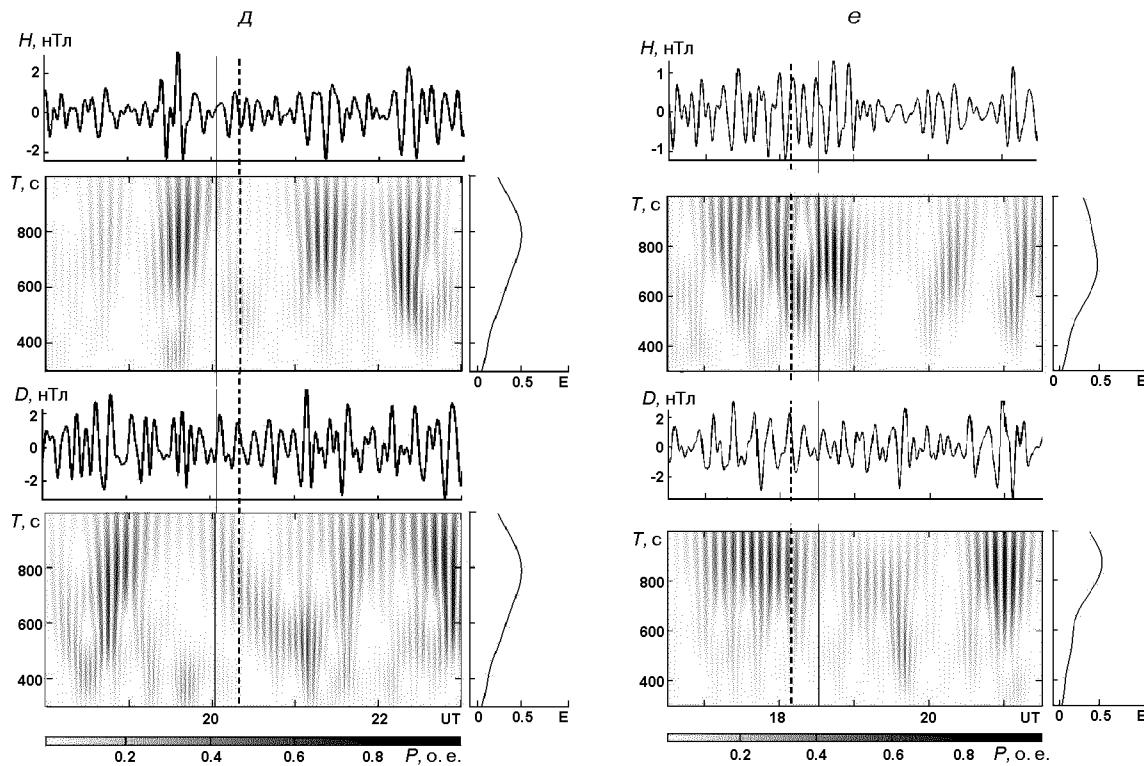


Рис. 1. Временные вариации H - и D -компонентов геомагнитного поля, соответствующие им вейвлет-спектры и распределения средней энергии E колебаний по периодам в диапазоне периодов 300–1000 с, сопровождавшие старты ракет. Сплошной вертикальной линией показан момент старта ракеты: a — «Союз» 31 мая 2005 г. (12:00 UT), b — «Рокот» 28 июля 2006 г. (07:05 UT), c — «Космос 3М» 26 сентября 2002 г. (15:30 UT), d — «Рокот» 29 октября 2003 г. (13:43 UT), d — «Молния» 19 июня 2003 г. (20:01 UT), e — «Рокот» 27 августа 2005 г. (18:34 UT). Пунктирными линиями показаны моменты захода Солнца на уровне Земли в месте расположения обсерватории и на высоте 200 км

26 сентября 2002 г. практически совпал с моментом захода Солнца на уровне Земли вблизи г. Харькова (рис. 1, c). Этот факт очень затрудняет принятие решений о наличии эффектов, связанных со стартом. Изменение характера сигнала началось примерно в 15:40 и длилось 30 и 50 мин для H - и D -компонентов соответственно. Скорее всего, вариации от вечернего терминатора и СР наложились друг на друга. Следующий слабо выраженный квазипериодический процесс, возможно связанный со СР, происходил в интервале времени 17:00–17:40.

Следующий старт ракеты 29 октября 2003 г. имеет уникальное значение для изучения реакции геомагнитного поля на воздействие высокоэнергетических процессов, так как в этом случае имели место три явления: сильнейшая маг-

нитная буря, прохождение вечернего солнечного терминатора (в 14:20 на уровне Земли) и СР «Рокот» с космодрома Плесецк, который произошел в 13:43 (рис. 1, e). Весьма затруднительно делать выводы о причастности определенного источника к какому-нибудь конкретному возмущению. Скорее всего, реакции на все три высокоэнергетических процесса наложились. Отчетливо фиксируемое увеличение амплитуды до 60 нТл и периода (от 3–4 до 8 мин) сигнала H -компонента началось в 14:15 и имело продолжительность 20 мин. В D -компоненте наблюдалось аналогичное возмущение, но с меньшими амплитудами (до 20 нТл). Можно предположить, опираясь на наши результаты [11], что это возмущение является откликом на генерируемую ракетой ударную волну. Следующее воз-

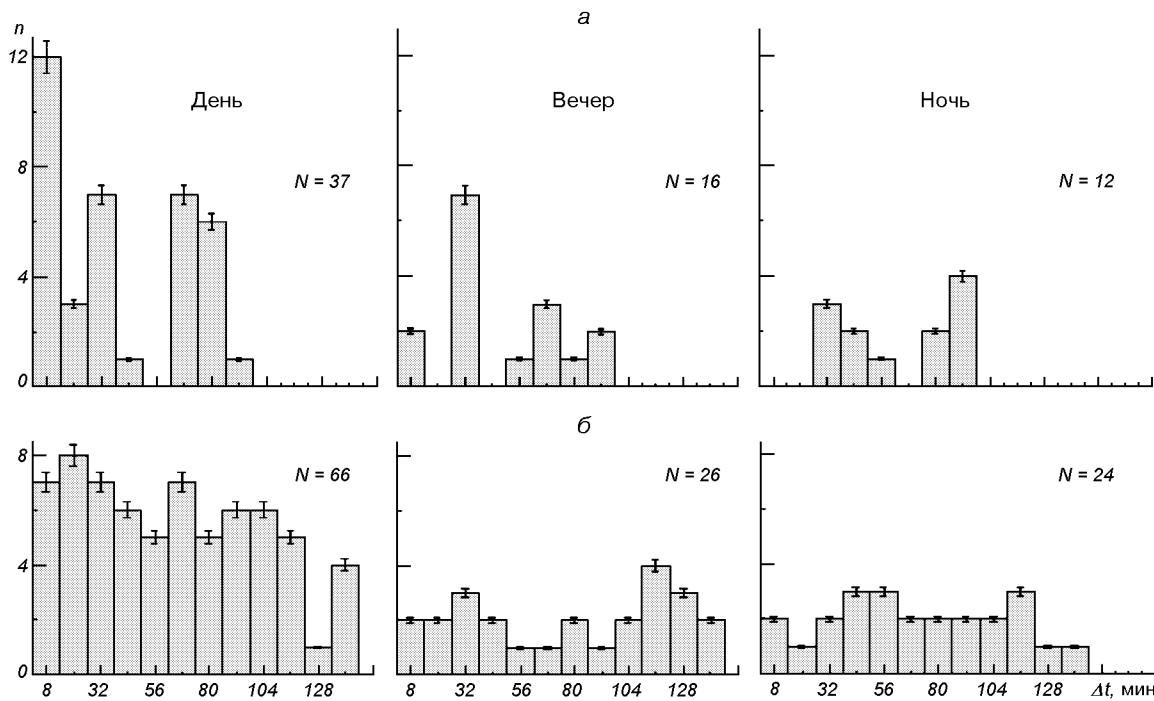


Рис. 2. Гистограммы времен запаздывания Δt для дневного, вечернего и ночных времени суток: *а* — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР, *б* — для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР)

мущение в *D*-компоненте с периодами 6—8 мин имело место в интервале времени с 14:50 до 15:30 с амплитудой 25 нТл. Скорее всего, оно было связано с заходом Солнца на высотах около 100 км, так как впоследствии (после 16:00) амплитуда пульсаций резко уменьшилась до 10 нТл, период преобладающих колебаний увеличился для обеих компонентов сигнала.

Старты ракет в ночное время. СР «Молния» имел место 19 июня 2003 г. в 20:01 (рис. 1, *д*). Примерно за 40 мин до старта в *H*-компоненте наблюдается квазипериодический процесс, связанный с прохождением вечернего термиатора. Он сопровождался увеличением амплитуды приблизительно в два раза. Для *D*-компонента сильный квазипериодический процесс регистрировался также в интервале времени 18:10—18:50.

Существенные изменения характера сигнала (увеличение периода и амплитуд волновых процессов) начались в 20:55 и 22:10 и имели продолжительности около 50 мин для *H*-компонента. Для *D*-компонента возмущения выражены менее ярко.

Пример регистрации уровня составляющих геомагнитного поля и соответствующие им вейвлет-спектры для СР «Рокот» в 18:34 27 августа 2005 г. приведены на рис. 1, *е*. Эффекты, связанные с заходом Солнца, скорее всего, прекратились к моменту запуска. Характер сигнала изменился в интервале времени с 19:05—19:10 до 19:55 для *H*- и *D*-компонентов соответственно. Заметим, что для *D*-компонента наблюдалось усиление уровня сигнала в 1.5—2 раза, а для *H*(*t*) имело место уменьшение амплитуды, обусловленное подавлением квазипериодического процесса (генерацией волновых возмущений примерно в противофазе). В 20:25 появилось существенное изменение характера колебаний (аналогичное предыдущему) продолжительностью 30—40 мин для *H*- и *D*-компонентов магнитного поля Земли соответственно.

Вейвлет-спектры до СР и после него заметно различались.

Характерные параметры возмущений. Гистограммы времен запаздывания, продолжительностей и периодов преобладающих колебаний приведены на рис. 2—4 для 16 СР. Из них

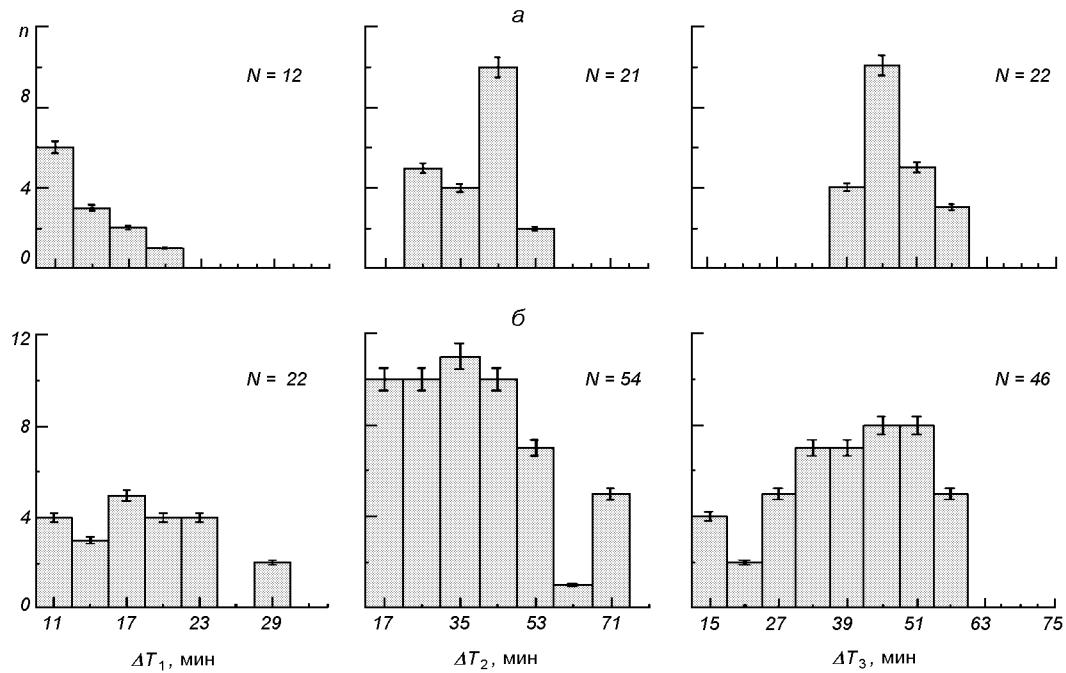


Рис. 3. Гистограммы продолжительностей ΔT_1 , ΔT_2 и ΔT_3 : *а* — для трех типов возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР, *б* — для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР)

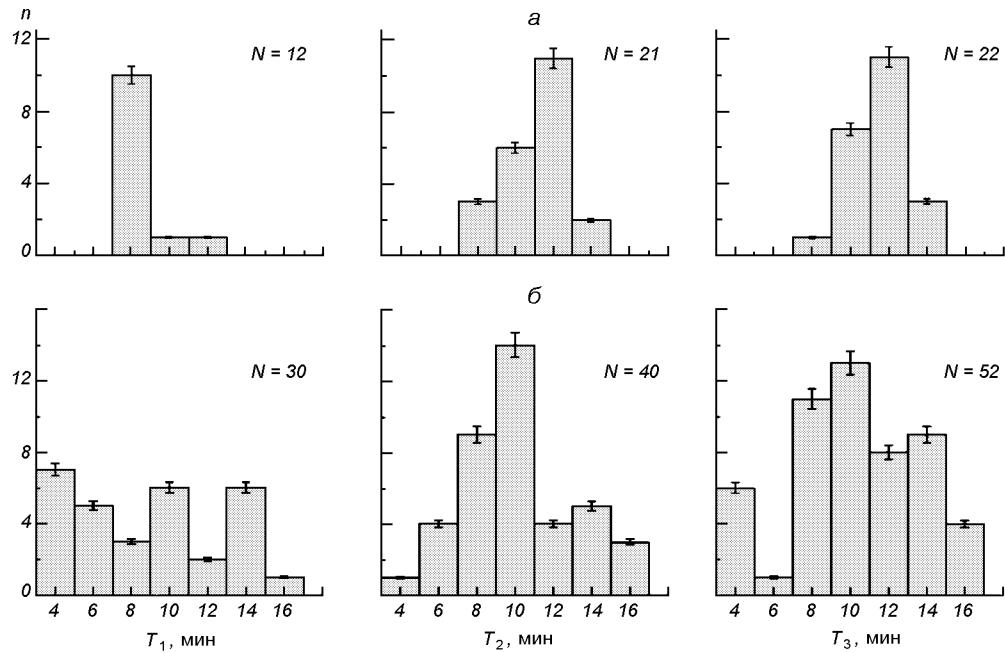


Рис. 4. То же для периодов T_1 , T_2 и T_3

дневных стартов было 7, вечерних — 6, ночных — 3. Там же приводятся соответствующие гистограммы для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР; выделение подобных эффектов для них проводилось относительно времен реальных стартов). Число выборок показано на соответствующих гистограммах. Максимальное число выборок при оценке времени запаздывания Δt возмущений $N = N_1 N_2 N_3$, где N_1 — число стартов в данный период суток, $N_2 = 3$ — число возможных возмущений, $N_3 = 2$ — число компонентов геомагнитного поля. При оценке продолжительностей ΔT возмущений и их периодов T число $N = N_3 N_4$, где N_4 — число всех стартов.

Из рис. 2, а — 4, а видно, что после старта в дневное, а возможно и вечернее время, имели место три группы возмущений с запаздываниями: $\Delta t_1 \approx 7.1 \pm 1.2$ мин, $\Delta t_2 \approx 30.5 \pm 1.1$ мин и $\Delta t_3 \approx 78.7 \pm 5.2$ мин. Продолжительности возмущений: $\Delta T_1 \approx 14.9 \pm 1.3$ мин, $\Delta T_2 \approx 42.3 \pm 1.92$ мин и $\Delta T_3 \approx 46.8 \pm 1.39$ мин. В ночное время возмущений, которым соответствовало запаздывание Δt_1 , не было. Периоды колебаний обычно составляли $T_1 \approx 7.2 \pm 0.6$ мин, $T_2 \approx 11.1 \pm 0.4$ мин и $T_3 \approx 11.9 \pm 0.5$ мин. Средние значения параметров возмущений и их средние квадратичные отклонения для 16 СР приведены в табл. 3.

Анализ данных для фоновых дней показал, что законы распределения времен запаздывания и продолжительностей возмущений от вообра-

Таблица 3. Значения основных параметров возмущений, сопутствовавших СР (Δt — времена запаздывания возмущений, ΔT и T — их продолжительности и периоды)

Параметр	Значение
Δt_1 , мин	7.1 ± 1.2
Δt_2 , мин	30.5 ± 1.1
Δt_3 , мин	78.7 ± 5.2
ΔT_1 , мин	14.9 ± 1.3
ΔT_2 , мин	42.3 ± 1.9
ΔT_3 , мин	46.8 ± 1.4
T_1 , мин	7.2 ± 0.6
T_2 , мин	11.1 ± 0.4
T_3 , мин	11.9 ± 0.5

жаемых СР оказались близкими к равномерным. Некоторое отклонение от равномерного закона связано с ограниченностью выборки, а также с влиянием возмущений другой природы (прохождений солнечного терминатора, изменений магнитной активности, вариаций космической и атмосферной погоды и т. п.).

ОБСУЖДЕНИЕ

Практически всем из рассмотренных стартов ракет сопутствовали заметные или значительные изменения характера сигнала. В большинстве случаев наблюдалось увеличение амплитуды пульсаций, но в ряде случаев (3 случая) имело место и подавление колебаний, что, по-видимому, свидетельствует о противофазном сложении волновых процессов. Практически всегда изменение характера сигнала сопровождалось изменением периодов квазипериодических процессов.

В дневное время чаще всего наблюдались три группы возмущений с $\Delta t_1 \approx 5-12$ мин, $\Delta t_2 \approx 25-40$ мин и $\Delta t_3 \approx 60-85$ мин. В ночное время наблюдались только две группы реакций с запаздываниями 35—45 мин и 80—95 мин соответственно для второго и третьего возмущения.

Первой группы возмущений ночью не было, днем же она появлялась в 86 % случаев, имела шумоподобный (высокочастотный) характер и продолжительность порядка 10 мин, небольшие амплитуды (2—4 нТл) и периоды 7—9 мин.

Вторая и третья группы возмущений представляли собой цуги колебаний продолжительностью 40—50 мин. Периоды составляли 10—12 мин. Параметры возмущений второй и третьей групп близки, поэтому не исключено, что они представляют собой части одного и того же волнового процесса.

В работе [11] высказано предложение, что возмущения магнитного поля генерируются на высотах 100—120 км. С одной стороны, на этих высотах имеют место достаточно большие значения концентрации электронов и плотности ионосферных токов, а значит, могут генерироваться волны электромагнитной природы. С другой стороны, на этих высотах плотность нейтральных частиц еще достаточно велика, и поэтому могут генерироваться ударные волны в

газе, превращающиеся на больших расстояниях в акусто-гравитационные волны.

Время Δt_0 достижения ракетой высоты $z = 100\text{--}120$ км зависит от типа ракеты и составляет 2–3 мин. При этом время распространения возмущений, наблюдавшихся вблизи г. Харькова равно $\Delta t' = \Delta t - \Delta t_0$. Тогда, исходя из средних значений Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 (см. табл. 3), получим, что $\Delta t'_1 \approx 4.1\text{--}5.1$ мин, $\Delta t'_2 \approx 27.5\text{--}28.5$ мин и $\Delta t'_3 \approx 76\text{--}77$ мин. При $R \approx 1500$ км им соответствуют скорости $v'_1 \approx 4.9\text{--}6.1$ км/с, $v'_2 \approx 880\text{--}910$ м/с и $v'_3 \approx 325\text{--}330$ м/с. Эти скорости распространения возмущений близки скоростям, полученным нами в работе [11]: $v'_1 \approx 9$ км/с, $v'_2 \approx 800\text{--}1100$ м/с и $v'_3 \approx 300\text{--}400$ м/с. Параметры трех типов возмущений при СР с космодрома Плесецк хорошо согласуются с аналогичными параметрами для 43 СР с космодрома Байконур.

Наименьшая из скоростей $v'_1 \approx 325\text{--}330$ м/с — скорость распространения акусто-гравитационных волн в Е-области ионосферы. Скорости $v'_2 \approx 880\text{--}910$ м/с ассоциируются со скоростью ударных волн, которые по мере удаления от источника постепенно превращаются в АГВ. Наиболее быстрые волны ($v'_1 \approx 4.9\text{--}6.1$ км/с), по-видимому, относятся к волнам магнитогидродинамической природы.

В фоновые дни, как и следовало ожидать, гистограммы для времен запаздывания возмущений от воображаемых СР и их продолжительностей существенно отличаются от аналогичных гистограмм в дни реальных СР. В фоновые дни нет четко выраженных групп времен запаздывания возмущений и их продолжительностей. Что касается периодов квазипериодических возмущений, то их набор в фоновые дни больше, чем в дни СР.

Таким образом, нами подтверждено наличие эффекта СР в вариациях геомагнитного поля и определены основные параметры и скорости распространения возмущений, которые согласуются с результатами других работ [2, 4–7, 11, 18]. Важно, что параметры магнитных и ионосферных возмущений близки между собой. Это повышает достоверность полученных результатов, а также свидетельствует об общем механизме генерации возмущений в ионосфере (атмосфере) и геомагнитном поле.

Выводы

- Изучена реакция геомагнитного поля на 16 стартов ракет с космодрома Плесецк. Установлено, что во всех случаях СР наблюдались заметные или значительные изменения характера колебаний.

- Выявлены три группы возмущений, имевших запаздывания 5–8, 25–40 и 60–85 мин. Им соответствовали продолжительности процессов 12–20, 40–50 и 42–55 мин и преобладающие периоды 6–8, 10–12 и 9–12 мин.

- Отмечено, что быстрые возмущения (скорости около 5–6 км/с) выражены менее ярко и наблюдались в дневное время в 6 случаях из 7 (примерно в 86 %). Возмущения со скоростями 880–910 и 325–330 м/с отмечались практически всегда и в любое время суток. Не исключено, что они являются частями одного процесса.

- Установлено, что результаты исследования реакции геомагнитного поля на СР с космодрома Байконур и Плесецк хорошо согласуются между собой, а параметры возмущений оказались в целом подобными.

Авторы благодарны К. П. Гармашу и С. Г. Лесуза за проведение систематических магнитометрических измерений.

- Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., Плотников А. В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 6.—С. 790—797.
- Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 143—162.
- Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия.—2006.—46, № 6.—С. 783—800.
- Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших старты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 57—61.
- Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия.—2004—44, № 4.—С. 518—534.

6. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 1.—С. 5—28.
7. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет «Союз» и «Протон» // Радиофизика и радиоастрономия.—2005.—10, № 3.—С. 254—272.
8. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно-возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1999.—№ 427, вып. 1.—С. 3—22.
9. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия.—1999.—39, № 1.—С. 72—78.
10. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флюктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
11. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 6.—С. 87—98.
12. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
13. Деминов М. Г., Ораевский В. Н., Ружин Ю. Я. Ионосферно-магнитосферные эффекты запусков ракет в сторону высоких широт // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 6.—С. 772—781.
14. Засов Г. Ф., Карлов В. Д., Романчук Т. Е. и др. Наблюдение возмущений в нижней ионосфере во время экспериментов по программе Союз—Аполлон // Геомагнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 2.—С. 346—348.
15. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4, № 3.—С. 227—246.
16. Нагорский П. М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэрономия.—1998.—38, № 2.—С. 100—106.
17. Нагорский П. М., Таращук Ю. Е. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты // Изв. вузов. Физика.—1993.—№ 10.—С. 94—106.
18. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—46, № 4.—С. 561—565.
19. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982.—134 с.
20. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
21. Черногор Л. Ф. Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
22. Черногор Л. Ф. Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 55—97.
23. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000.—640 с.
24. Arendt P. R. Ionospheric undulations following Apollo 14 Launching // Nature.—1971.—231.—Р. 438—439.
25. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching // Radio Physics and Radio Astronomy.—1998.—3, N 2.—Р. 181—190.
26. Foster J. C., Holt J. M., Lanzerotti L. J. Mid-latitude ionospheric perturbation associated with Spacelab-2 plasma depletion experiment at Millstone Hill // Ann. Geophys.—2000.—18.—Р. 111—120.
27. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., et al. Radiophysical investigations and modeling of ionospheric processes generated by sources of various nature. 2. Processes in a modified ionosphere signal parameters variations. disturbance simulation // Telecommunications and Radio Engineering.—1999.—53, N 6. Р. 1—22.
28. Noble S. T. A Large-amplitude traveling ionospheric disturbance excited by the space shuttle during launch // J. Geophys. Res.—1990.—95, N A11.—Р. 19.037—19.044.

WAVE DISTURBANCES OF GEOMAGNETIC FIELD ASSOCIATED WITH ROCKET LAUNCHES FROM THE PLESetsk COSMODROME

L. F. Chernogor, M. A. Shamota

We analyses the results of observations of geomagnetic field variations in 1—1000 s period range that accompanied 16 rocket launches from the Plesetsk cosmodrome in 2002—2007. The measurements were made near Kharkiv city at a distance 1500 km from the cosmodrome. Our analysis revealed three groups of disturbances with time delays of 5—12, 25—40 and 60—85 min and durations of 12—20, 40—50 and 42—55 min, respectively. The 6—8, 10—12 and 10—12 min geomagnetic micropulsation periods become dominant, and their amplitudes attained a value of 3—5 nT.

УДК 549.903

Н. М. Куссуль, А. Ю. Шелестов, С. В. Скаун, К. Г. Житомирська

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Київ
inform@ikd.kiev.ua

Автоматична система прогнозування міжпланетних ударних хвиль у сонячному вітрі

Надійшла до редакції 31.08.07

Описується автоматична система прогнозування міжпланетних ударних хвиль (УХ) у сонячному вітрі. Запропонована система складається з трьох модулів: модуля ідентифікації початку УХ, модуля класифікації УХ та модуля прогнозу часу прибуття УХ. У першому модулі використовується порогова фільтрація по узагальнених характеристиках потоку протонів сонячного вітру. Другий та третій модулі реалізовані на основі нейромережевих обчислень та дозволяють визначати тип УХ та час до прибуття УХ відповідно. Всі три модулі орієнтовані на використання даних інструмента EPAM супутника ACE, а їхні результати верифікуються за незалежними спостереженнями сонячних спалахів центру ІЗМІРАН. Всі числові експерименти проводилися для даних спостережень піку останнього циклу сонячної активності, що припав на 2000 рік, коли було зафіксовано 40 ударних хвиль.

ВСТУП

Космічною погодою називають комплекс зовнішніх, переважним чином сонячних, впливів на верхні шари атмосфери та іоносферу Землі, що потенційно впливають на функціонування космічних та наземних систем, а також біосфери та здоров'я людей [9]. Останнім часом космічна погода та її дослідження набувають все більшої ваги, адже космічні бурі можуть привести до суттєвих пошкоджень таких високотехнологічних систем, як системи зв'язку, супутників та навігаційні системи, електромережі. Наприклад, надзвичайна геомагнітна буря 13 березня 1989 р. спричинила 9-годинне вимкнення електростанції у провінції Квебек [7], однієї з найбільших станцій Північної Америки, що коштувало близько 13.2 млн дол., серед яких ціна пошкодженого обладнання склала 6.5 млн. Також під час цієї бурі була пошкоджена ядерна станція у Нью-Джерсі, що коштувало ще декілька мільйонів доларів. Найбільше космічна активність впливає на космічні станції та супут-

ники. У 1973 р. станція «Skylab» вийшла на нестабільну орбіту та згодом згоріла у атмосфері Землі через більшу за заплановану сонячну активність (<http://www-pao.ksc.nasa.gov/history/skylab/skylab-operations.htm>). Екстремальний викид радіації, викликаний так званим «Днем Бастілії» 14 липня 2000 р., спричинив появу більш ліній на ПЗЗ-матриці обсерваторії SOHO. Незважаючи на прогнозоване зниження сонячної активності, останні роки характеризуються низкою надзвичайно небезпечних сонячних викидів. За період з жовтня по листопад 2003 р. спостерігалася серія надзвичайних сонячних спалахів, що привело до вимкнення енергосистеми у Швеції, пошкоджень супутників та першого в історії попередження про небезпеку радіаційного впливу для пасажирів літаків на висоті 8 км [10]. Спалах 28 жовтня 2003 р. став найбільшим за впливом на Землю з часу обриву телеграфного зв'язку у 1859 р. Він вивів з ладу японський супутник «Kodama», що не провів на орбіті 1 рік. Під час сонячного спалаху 13—16 грудня 2006 р. постраждало декілька

космічних місій, включаючи Envisat та Cluster, а також відбулися широкомасштабні відключення систем зв'язку в Китаї. У результаті Європейське космічне агентство заявило про необхідність посилення досліджень космічної погоди та створення систем прогнозу (http://www.esa.int/SPECIALS/ESOC/SEMB49QJNVE_0.html).

У періоди підвищення сонячної активності, що частішають протягом максимумів 11-річних сонячних циклів, у короні Сонця народжуються потоки рентгенівського випромінювання та сонячних енергетичних частинок (СЕЧ), а також відбуваються викиди великих мас плазми (КВМ) та магнітного поля у міжпланетний простір. При цьому у СВ утворюються ударні хвилі (УХ) як аномальні посилення інтенсивності СВ, що викликають збурення магнітосфери Землі. Інтервал між часом генерації УХ та досягненням фронтом Землі становить декілька діб, а у випадку її спрямування точно у напрямку Землі — півтори-двоє доби. Прогнозування часу приходу УХ та її пікової інтенсивності дозволить прийняти відповідні заходи з мінімізації негативного впливу сонячної активності. Саме тому дистанційна ідентифікація УХ у СВ та визначення часу до її приходу є однією з найважливіших задач моніторингу та короткострокового прогнозу космічної погоди у навколоzemному просторі.

СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ

Дистанційні спостереження КВМ за допомогою коронографів дають теоретичну можливість будувати прогноз УХ на декілька діб, але для цього потрібно створити адекватну модель поширення та викидів КВМ у геліосфері та поширення СВ у міжпланетному просторі, що надзвичайно ускладнюється через брак спостережного матеріалу. Іншим підходом до прогнозу є використання емпіричних моделей, які спираються на фізичні методи, інтелектуальні методи та методи системного аналізу. В більшості цих моделей використовуються дані супутника ACE та обсерваторії SOHO. До фізичних моделей відносяться STOA (Shock Time Of Arrival), яка спирається на теорію подібності вибухових хвиль [11, 17]; ISPM (Interplanetary Shock Propagation Model), в якій моделюються 2.5-вимірні

магнітогідродинамічні потоки [18]; кінетична модель сонячного вітру HAF (Hakamada — Akasofu — Fry) [12] та тривимірна МГД-модель [16]. Також задачі прогнозу космічної погоди розв'язуються із застосуванням моделі нелінійної авторегресії з ковзним середнім та екзогенним доповненням (NARMAX) [8, 14]. Головним недоліком усіх наведених моделей є надзвичайна складність обчислень або низька точність прогнозу, а також необхідність додаткової інформації, яку може надати лише оператор.

Для створення адаптивних систем аналізу даних космічної погоди використовують нейронні мережі. У роботі [19] запропоновано використовувати нейромережевий підхід для прогнозування часу прибуття УХ на Землю за даними інструмента EPAM супутника ACE. У якості початку УХ (onset) автори розглядають надзвичайні посилення інтенсивності частинок на усьому енергетичному спектрі, але використовують модель з невідомим алгоритмом його визначення. Застосовуються рекурентні нейронні мережі, які навчені та протестовані лише на 56 УХ за період з 1997 по 2001 рр., коли їхня загальна кількість за цей період складала 160. Зазначена помилка прогнозу за 24 год до реального часу прибуття УХ складає 8.9 год, а за 12 год — 4.6 год.

В даній роботі розвивається підхід, запропонований у роботі [19]. При цьому розроблено більш ефективну процедуру визначення початку УХ, а також удосконалено метод визначення часу прибуття УХ. Крім того, пропонується підхід, що дозволяє заздалегідь (на початку зародження УХ) визначити ступінь її небезпечності.

Описується система з трьох модулів: модуля ідентифікації початку УХ, модуля класифікації УХ та модуля прогнозу часу прибуття УХ. В першому модулі використовується порогова фільтрація за узагальненими характеристиками потоку протонів сонячного вітру. Другий та третій модулі реалізовані на основі нейромережевих обчислень та дозволяють визначати тип УХ та час прибуття УХ відповідно.

Усі три модулі орієнтовані на використання даних інструмента EPAM супутника ACE, а їхні результати верифікуються за незалежними спостереженнями сонячних спалахів центру ІЗМІРАН [4].

ДАНІ ACE/EPAM

Головною метою космічної обсерваторії ACE (Advanced Composition Explorer), запущеної у 1997 р., є спостереження Сонця, сонячної корони, сонячного вітру тощо. Супутник ACE проводить спостереження в так званій точці Лагранжа L1 — лібраційній точці поблизу лінії Земля — Сонце — на відстані 1.5 млн км від Землі (або приблизно 1 % від загальної відстані до Сонця). Монітор протонів, електронів та альфа-частинок (EPAM) супутника ACE вимірює спектри заряджених частинок в точці L1 та може використовуватися для спостережень ударних хвиль у сонячному вітрі. Дані безпосередніх вимірювань вільно розповсюджуються через мережу інтернет [1, 2]. Як входи до моделей ідентифікації УХ, прогнозів типу та часу прибуття були використані п'ять енергетичних каналів інструменту EPAM (табл. 1).

Для верифікації запропонованих моделей використовувалися наступні додаткові дані: дані монітора протонів, електронів та альфа-частинок сонячного вітру (SWEPAM) супутника ACE, що надає детальну інформацію про поточний стан сонячного вітру, та дані ІЗМІРАН про геомагнітні шторми та космічні бурі [4]. Усі числові експерименти проводилися на даних спостережень піку останнього циклу сонячної активності, що припав на 2000 рік, коли було зафіксовано 40 ударних хвиль.

Таблиця 1. Характеристики каналів приладу ACE/EPAM LEMS30

Канал	Енергетичний діапазон, MeВ (протони)
P1	0.047—0.065
P3	0.112—0.187
P5	0.310—0.580
P6	0.580—1.06
P7	1.06 — 1.91

СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ

Виміри супутника ACE дозволяють зафіксувати УХ та її параметри: кількість заряджених частинок, швидкість та густину потоку поблизу магнітосфери Землі. Завдяки тому що радіохвилі поширяються у тисячі разів швидше за сонячний вітер, сигнал про збільшення сонячної активності з супутника ACE може передати прибуття УХ на 10—40 хвилин. Достовірність прогнозу такого роду (тривалістю до 1 год) становить близько 100 %, адже він засновується на прямих спостереженнях біля самої границі навколоземного простору. На жаль, часова обмеженість цього прогнозу не дозволяє використовувати його у більшості прикладних задач. Для побудови прогнозу з більшим запасом часу (на 24—48 год) застосовують фізичну модель поширення УХ у СВ, що дозволяє розглядати процес прибуття ударної хвилі на Землю у декілька етапів.

Різке, не властиве звичайній картині коливань, збільшення інтенсивності СЕЧ у всіх діапазонах називають початком розвитку УХ (onset). Перевищення інтенсивності СЕЧ критичного порогу, що характеризується початком значних геомагнітних збурень і потенційною небезпекою для систем та живих істот, називають піком інтенсивності. Звичайно інтервал часу між початком розвитку ударної хвилі та першим небезпечним піком становить 12—48 год, в залежності від швидкості сонячного вітру та напряму поширення ударної хвилі.

Для попередження ударних хвиль у реальному часі пропонується система прогнозування ударних хвиль у сонячному вітрі, яка складається з детектора УХ та двох нейромережевих модулів для визначення типу та часу прибуття УХ (рис. 1).

Алгоритм ідентифікації ударних хвиль. Модуль детектора УХ реалізує запропонований у [6] алгоритм ідентифікації початку УХ. Модуль

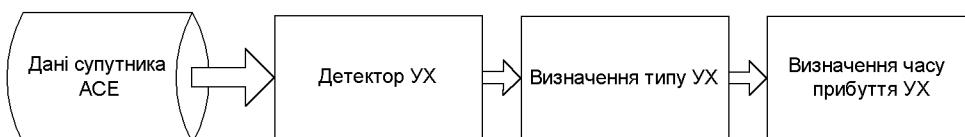


Рис. 1. Архітектура системи прогнозування

мент початку УХ визначається пороговим фільтром, який використовує узагальнені характеристики спостережень інструменту EPAM супутника ACE для ідентифікації розвитку УХ у сонячному вітрі. Для входу використовуються дві узагальнені швидкості інтенсивності потоку. Перша отримана шляхом інтеграції похідних інтенсивностей протонів (швидкостей) в окремих каналах, а друга є похідною швидкості у об'єднаному каналі.

Алгоритм ідентифікації ударних хвиль, докладно описаний у роботі [6], складається з таких етапів.

1. Попередня обробка вхідних даних з використанням лінійного згладжування.

2. Визначення узагальнених характеристик: інтенсивності частинок для узагальненого канала та зміни інтенсивності потоку для узагальненої швидкості.

3. Визначення зростання інтенсивності загального потоку з використанням порогового фільтра за узагальненими швидкостями.

Для ідентифікації моменту початку УХ використовуються такі узагальнені характеристики.

$P(t)$ — інтенсивність узагальненого канала як об'єднання даних усіх інформативних каналів EPAM;

$V_M(t)$ — узагальнена мультиплікативна швидкість як об'єднання швидкостей зростання інтенсивності в окремих каналах;

$V_C(t)$ — узагальнена швидкість як зміна інтенсивності в узагальненому каналі.

Ці значення обчислюються за виразами

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t),$$

$$V_i(t) = \frac{dP_i(t)}{dt},$$

$$V_M(t) = \prod_{i=1}^N V_i(t)$$

$$V_C(t) = \frac{dP(t)}{dt},$$

де $P_i(t)$ — інтенсивність в каналі i у момент часу t ,

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \frac{P_i(t) - P_i(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

— похідна інтенсивності у каналі $P_i(t)$, Δt —

проміжок часу між послідовними вимірюваннями.

Числові значення порогу для запропонованого алгоритму були отримані з історичних даних (насамперед, з даних за 2000 р.) шляхом мінімізації загальної похибки при максимізації кількості визначених УХ:

$$L_M = \arg \min_{L_M, t \notin T} \max_{L_M, t \in T} (V_M(t) \geq L_M),$$

$$L_C = \arg \min_{L_C, t \in T} \max_{L_C, t \notin T} (V_C(t) \geq L_C),$$

де L_M — значення порогу для першого фільтра, L_C — значення порогу для другого фільтра, T — масив значень дат з вираженими стрибками сонячного вітру.

Час та інтенсивність УХ у запропонованому алгоритмі верифікується швидкістю та густиною сонячного вітру за вимірами SWEPM супутника ACE. Незвичайні стрибки цих характеристик традиційно пов'язують з попередніми УХ та широко використовують у дослідженнях космічної погоди.

Для роботи в режимі реального часу було використано комбінований подвійний фільтр, в якому початок УХ визначається або за першим, або за другим фільтром. Якщо узагальнена швидкість ($V_M(t)$ або $V_C(t)$) потоку протонів перевищує визначений поріг, то така надзвичайна активність розглядається як початок УХ. Момент початку УХ визначається за наступним подвійним предикатором (DP):

$$DP = (V_M(t) \geq L_M) \vee (V_C(t) \geq L_C),$$

де \vee — логічне «АБО».

Результати експериментів доводять конкурентоспроможність описаного підходу. Так, у даних за 2000 р. вдалось ідентифікувати 89 % періодів активності, що визначаються за спостереженнями інструменту SWEPM. Розроблений алгоритм автоматичного визначення УХ точніший за використаний у роботі [19], що підтверджується даними незалежних спостережень [4]. Крім того, він надійно визначає УХ різних типів, включно зі слабкими та помірними хвилями, які не розглядалися у роботі [19].

Алгоритм класифікації ударних хвиль. Модуль визначення типу УХ (рис. 1) забезпечує нейромережеву класифікацію УХ на два типи: безпечні та небезпечні УХ. Загалом за кла-

сифікацією NOOA [3] УХ розділяють на п'ять класів: S1 (слабка), S2 (помірна), S3 (сильна), S4 (небезпечна), S5 (надзвичайна). Для практичного застосування в даній роботі ударні хвилі розділено на класи відносно безпечних (S1 та S2) та небезпечних (S3, S4, S5).

Для класифікації УХ використовується автoreгресійна модель з зовнішнім входом NARX, з нейронною мережею прямого поширення та вхідними даними, доповненими часовим вікном [5]. Чисельні дослідження показали, що така модель може ефективно навчатися, а її результат виявляється найкращим серед інших відомих методів, включаючи моделі рекурентних нейронних мереж, які використовуються в роботі [19] та мають більш складну структуру.

Як вхід для мережі використовуються дані інтенсивності по каналах за поточний момент часу та за 9 попередніх вимірів (розмір часового вікна складає 50 хв):

$$NN_{IN} = \{\hat{P}_i(t - k\Delta t), i = 1, \dots, N, k = 0 \dots 9\},$$

де $\hat{P}_i(t)$ — нормалізована інтенсивність в каналі i у момент часу t , N — кількість інформативних каналів (тут $N = 5$), Δt — проміжок часу між послідовними вимірами (5 хв).

Для нормалізації даних пропонується застосувати асиметричне афінне перетворення:

$$\hat{x}_j = \begin{cases} \text{th}\left(\frac{x_j - x_c}{x_{\max} - x_c} K\right), & \text{якщо } x_j \geq x_c, \\ \frac{x_j - x_c}{x_{\max} - x_c} K, & \text{якщо } x_j \leq x_c, \end{cases}$$

де \hat{x}_j , x_j — нормалізоване та початкове j -те значення параметра, x_c — середнє значення параметра (медіана), $\max x$ — найбільше значуще значення параметра, $\min x$ — найменше значуще значення параметра, K — коефіцієнт стиснення ($K = 1$).

В якості класифікатора використовується нейронна мережа прямого поширення $NN_{50 \times 70 \times 1}$, вхідний шар якої містить 50 нейронів, прихований — 70, а вихідний шар складається з одного нейрона. Вихід нейронної мережі інтерпретується наступним чином: якщо $NN_{out} > 0$ — поточні спостереження відносяться до небезпечної УХ, в іншому разі — до безпечної УХ.

Алгоритм прогнозу часу прибуття ударної хвилі. Для прогнозування часу прибуття УХ

будемо використовувати нейронну мережу прямого поширення з 65 входами, 90 нейронами у прихованому шарі та одним вихідним нейроном — $NN_{65 \times 90 \times 1}$:

$$NN_{IN} = \{\hat{P}_i(t - k\Delta t), \hat{V}_i(t - k\Delta t), \hat{P}(t - k\Delta t), \hat{V}_c(t - k\Delta t), \hat{V}_M(t - k\Delta t), i = 1, \dots, N\}, \\ k = 0, \dots, 4,$$

де $\hat{P}_i(t)$ — нормалізоване значення інтенсивності в каналі i у момент часу t , $\hat{V}_i(t)$ — нормалізована згладжена швидкість за каналом i , $\hat{P}(t)$ — нормалізоване значення інтенсивності узагальненого каналу, $\hat{V}_c(t)$ — нормалізована узагальнена швидкість за узагальненим каналом, $\hat{V}_M(t)$ — нормалізована узагальнена швидкість за швидкостями окремих каналів, N — кількість інформативних каналів, Δt — проміжок часу між послідовними вимірами (5 хв).

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Результати ідентифікації ударних хвиль. На основі запропонованого алгоритму з подвійним фільтром для 2000 року визначено 40 УХ, у п'яти з яких не спостерігається жодного достатньо небезпечноного піку інтенсивності, у 18 спостерігаються лише слабкі піки ($P_1(t) \geq 10^4$), у 12 — помірні піки ($P_1(t) \geq 10^5$) та у п'яти — піки великої потужності ($P_1(t) \geq 10^6$).

На рис. 2 наведено графічну інтерпретацію процесу прибуття ударних хвиль та їхньої класифікації за потужністю піків у реальному часі. По осі абсцис відкладені окремі УХ, а по осі ординат — час від моменту ідентифікації ударних хвиль до закінчення періоду активності. Досягнення першого піку певної потужності для кожної УХ виділено зміною кольору. Видно, що більшість ударних хвиль за декілька діб розвивається від потоків з невеликою інтенсивністю до небезпечних піків.

Результати застосування алгоритму до історичних даних дали можливість зафіксувати початок розвитку УХ у 89 %, що майже утричі більше за результат фільтру, запропонованого у роботі [19]. Отримані результати дозволили створити систему визначення УХ у реальному режимі часу, що успішно працює з вересня

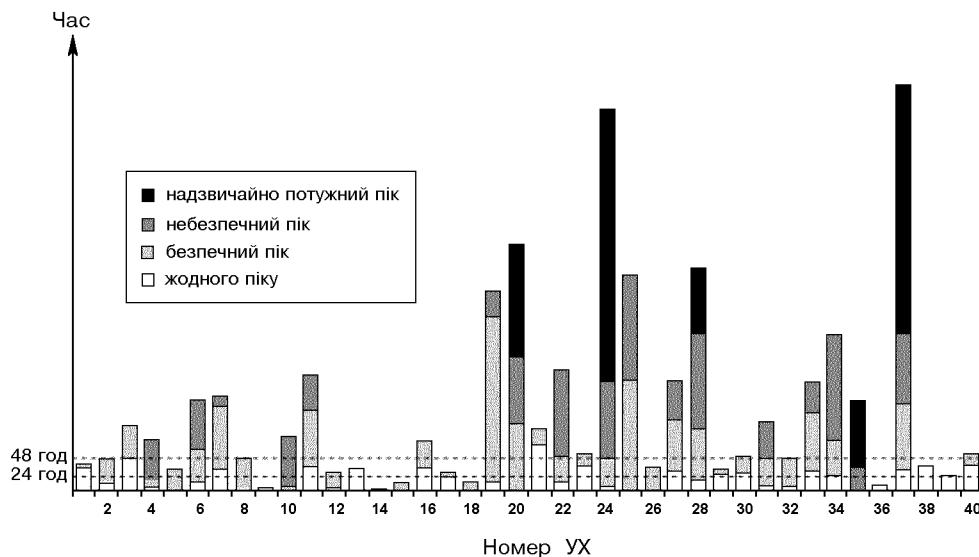


Рис. 2. Класифікація УХ по перших піках різної потужності у режимі реального часу для УХ за 2000 рік

2006 р. (доступний на порталі «Космічна погода» <http://spaceweather.org.ua>).

Результати класифікації ударних хвиль. Отриманий на попередньому кроці список УХ за 2000 р. забезпечує дані для модуля класифікації. Для проведення експериментів вектори спостережень у окремі моменти часу по кожній УХ були трансформовані у загальний масив даних, що у свою чергу був розбитий на навчальну вибірку (9954 вектори) та на тестову (6636 вектори). Для навчання використано один з різновидів алгоритму зворотного розповсюдження помилки за методом градієнтного спуску алгоритм Resilient Propagation (Rprop) [15], а саме його адаптивна реалізація iRPROP [13]. Алгоритм відноситься до класу алгоритмів групового навчання, у яких корекція ваги у мережі проводиться після пред'явлення усіх навчальних векторів. Основною перевагою обраного алгоритму є простота реалізації при великій швидкості збіжності для складних нейронних мереж.

В якості оцінки ефективності нейронної мережі було використано значення середньої квадратичної похибки MSE:

$$MSE = \frac{\sum_{t=0}^{t=NT-1} (NN_{OUT}(IN_t) - OUT_t)^2}{NT},$$

де $NN_{OUT}(IN_t)$ — вихід нейронної мережі від входу IN_t , OUT_t — бажаний вихід, NT — розмір навчальної або тестової вибірки.

Класифікація ударних хвиль виконувалася на нейронній мережі з різною кількістю прихованих нейронів. Найкращий результат був отриманий для мережі з 70 нейронами у прихованому шарі, тому саме така архітектура була реалізована у модулі визначення типу УХ (рис. 1). Для такої архітектури середня квадратична похибка для навчальної вибірки складає 0.0969854. Похибка на тестових даних, які не використовувалися при навчанні, складає 0.0980823.

Для демонстрації спроможності нейронної мережі відрізняти різні класи УХ використовувалися такі параметри:

— середній вихід (МОС), що відповідає середньому виходу нейронної мережі за період від моменту її ідентифікації до закінчення періоду активності:

$$MOC^d = \frac{\sum_{t=t_{onset}}^{t=t_{IPshock}} NN_{OUT}(IN_t^d)}{t_{IPshock} - t_{onset}},$$

де $NN_{OUT}(IN_t^d)$ — вихід нейронної мережі від входу IN_t^d для ударної хвилі $d = 1 \dots 40$, t_{onset} , $t_{IPshock}$ — час початку УХ та прибуття першого піку,

Таблиця 2. Результати тестування по окремих УХ

№	Дата та час початку, 2000 р.	Дата та час закінчення, 2000 р.	Клас УХ (безпечна чи небезпечна)	MSE	MOC	CAR
1	01 січня, 12:25	02 січня, 02:00	бп	0.2310	-0.1034	0.6426
2	09 січня, 10:25	11 січня, 06:45	бп	0.2420	-0.1455	0.4545
3	19 січня, 10:30	23 січня, 06:45	бп	0.1413	-0.3009	0.8976
4	27 січня, 04:10	30 січня, 07:00	нбп	0.218	0.3195	0.5569
5	06 лютого, 09:20	07 лютого, 04:25	бп	0.9810	0.9809	0
6	10 лютого, 11:45	14 лютого, 07:55	нбп	0.0640	0.7382	0.9069
7	18 лютого, 08:40	21 лютого, 12:10	нбп	0.0813	0.6082	0.9039
8	24 лютого, 04:15	26 лютого, 12:50	бп	0.3901	0.1222	0.5873
9	01 березня, 01:45	01 березня, 02:05	бп	0.0685	-0.4850	1
10	22 березня, 02:20	25 березня, 04:40	нбп	0.1078	0.6423	0.7727
11	04 квітня, 09:35	08 квітня, 06:30	нбп	0.0017	0.9779	1
12	23 квітня, 01:25	24 квітня, 03:00	бп	0.0972	-0.3955	0.98
13	28 квітня, 03:00	29 квітня, 10:10	бп	0.1249	-0.3614	0.872
14	01 травня, 04:05	01 травня, 06:35	бп	0.1442	-0.2513	0.9354
15	02 травня, 01:40	03 травня, 02:55	бп	0.5938	0.5411	0
16	06 травня, 06:05	09 травня, 01:55	бп	0.2361	-0.0869	0.6465
17	11 травня, 11:00	13 травня, 01:30	бп	0.1283	-0.3005	0.9185
18	13 травня, 06:10	14 травня, 05:15	бп	0.1051	-0.3514	1
19	14 травня, 07:20	25 травня, 12:25	нбп	0.0842	0.5584	0.9287
20	04 червня, 11:10	15 червня, 01:20	нбп	0.0048	0.9374	1
21	16 червня, 02:50	19 червня, 06:25	бп	0.1617	-0.3062	0.7967
22	22 червня, 12:00	28 червня, 02:55	нбп	0.2580	0.2524	0.5636
23	29 червня, 04:20	01 липня, 09:15	бп	0.1413	-0.4383	0.8028
24	09 липня, 01:10	29 липня, 12:40	нбп	0.0956	0.6757	0.8058
25	05 серпня, 08:25	18 серпня, 02:20	нбп	0.1048	0.4951	0.8729
26	02 вересня, 05:55	03 вересня, 03:00	бп	0.6651	0.6279	0
27	04 вересня, 08:20	08 вересня, 09:00	нбп	0.0536	0.7899	0.88477366
28	12 вересня, 06:10	21 вересня, 05:20	нбп	0.0022	0.9812	1
29	28 вересня, 12:25	29 вересня, 07:35	бп	0.0777	-0.4869	0.9794
30	03 жовтня, 01:05	05 жовтня, 02:30	бп	0.1396	-0.3242	0.8626
31	11 жовтня, 12:30	14 жовтня, 08:50	нбп	0.0244	0.7626	1
32	16 жовтня, 07:35	18 жовтня, 04:00	бп	0.2008	-0.1239	0.6811
33	26 жовтня, 12:45	30 жовтня, 12:55	нбп	0.0233	0.8257	0.9968
34	30 жовтня, 01:15	06 листопада, 10:40	нбп	0.0845	0.6013	0.8343
35	08 листопада, 11:25	14 листопада, 05:30	нбп	0.0623	0.7576	0.8461
36	22 листопада, 06:15	23 листопада, 02:50	бп	0.2555	-0.0143	0.3173
37	23 листопада, 03:55	11 грудня, 07:10	нбп	0.0755	0.6789	0.9107
38	12 грудня, 06:25	14 грудня, 06:20	бп	0.0161	-0.8292	0.9976
39	18 грудня, 09:15	19 грудня, 06:50	бп	0.4116	0.1881	0.5192
40	22 грудня, 11:55	24 грудня, 04:55	бп	0.0385	-0.6752	0.9772

— відсоток правильних відповідей (CAR), що відповідає кількості правильних відповідей нейронної мережі за період від моменту її ідентифікації до закінчення періоду активності:

$$\text{CAR}^d = \frac{\sum_{t=t_{\text{onset}}}^{t=t_{IPshock}} P[\text{sign}(NN_{OUT}(IN_i^d)), OUT^d]}{t_{IPshock} - t_{\text{onset}}},$$

де $P(x, y)$ — предикат, що за умови $x = y$ рівний 1, та рівний 0 у інших випадках.

Результати застосування навченої нейронної мережі для класифікації УХ приведені у табл. 2.

Приклади застосування навченої нейронної мережі у режимі реального часу до УХ різних типів — безпечних та небезпечних — приведені на рис. 3, а та 3, б відповідно.

Безпечна ударна хвиля (рис. 3, а), що спостерігалася протягом чотирьох днів та характеризувалася лише слабкими піками інтенсивності потоку протонів, більшість часу класифікувалася нейронною мережею як безпечна (на ри-

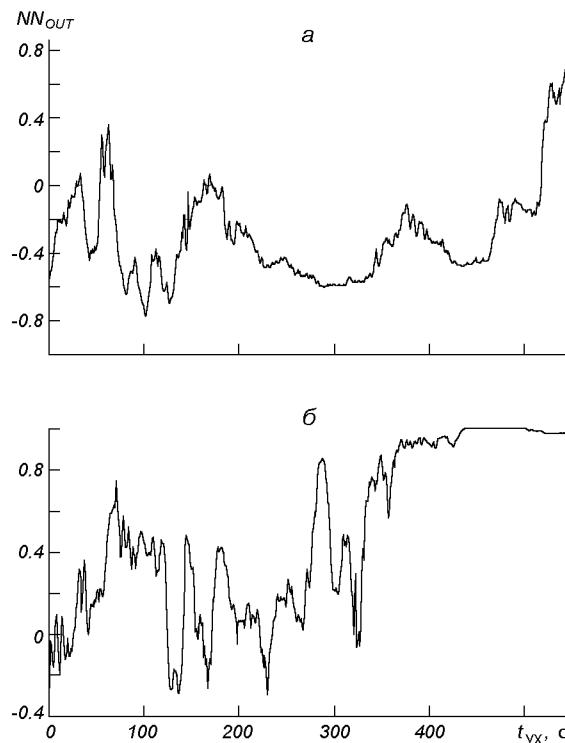


Рис. 3. Результати класифікації: *а* — безпечної УХ (19—23 січня 2000 р.), *б* — небезпечної УХ (18—21 лютого 2000 р.)

сунку виходи лежать у нижній (від'ємній) півплощині відносно осі абсцис). Навпаки, небезпечна УХ (рис. 3, *б*) ще на початку розвитку була правильно віднесена до класу небезпечних (виходи на рисунку лежать у верхній (додатній) півплощині), що згодом підтвердилося прибуттям відповідних УХ.

Серед 23 безпечних УХ було правильно визначено 80.59 % вхідних значень, тобто похибка другого роду для приведеної моделі становить 0.1941. Серед критичних 17 небезпечних УХ тип було правильно визначено для 91.6 % вхідних значень, тобто похибка першого роду становить 0.084. Загальний відсоток правильних відповідей нейронної мережі становить 88 %.

Результати прогнозу часу прибуття ударної хвилі. Отримані на попередньому кроці дані про УХ значної потужності за 2000 рік були розбиті на навчальну вибірку (4017 вхідних векторів) та на тестову (2679 вхідних векторів). В результаті експериментів по визначеню оп-

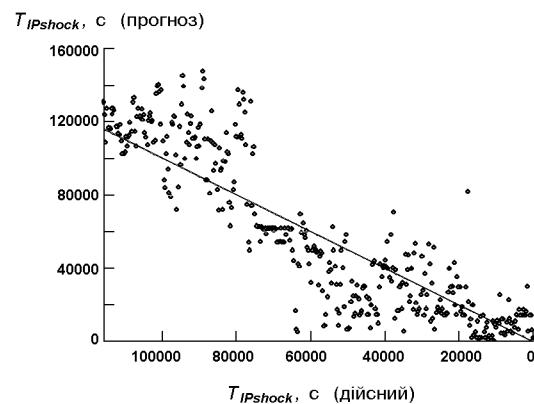


Рис. 4. Кореляція прогнозованих і дійсних значень часу $T_{IPshock}$ прибуття УХ (10—14 лютого 2000 р.). Пряма — лінія рівних значень

тимальної кількості нейронів у прихованому шарі найкращий результат у термінах середньої квадратичної похибки був отриманий для мережі з 90 прихованими нейронами. При навчанні нейронної мережі середня квадратична похибка складає 0.0969854. Похибка на тестових даних, які не використовувалися при навчанні, складає 0.0980823.

Застосування навченої нейронної мережі (рис. 4) дозволяє отримати прогноз з середньою точністю у 77 % (при порозі похибки у 1 %) у діапазоні прогнозів від 6 до 48 год до прибуття ударної хвилі, але для короткочасного прогнозу прибуття (за період до 6 год до реального часу) середня точність прогнозу зменшується. Однак практичну цінність має більш довготривалий прогноз, оскільки він дозволяє завчасно вживати заходів щодо запобігання небезпечним наслідкам, тому короткочасний прогноз (до 6 год) можна не брати до уваги.

Середня похибка прогнозу за 24 год до приходу УХ становить 6.23 год, а за 6 год — 2.78842 год. Зменшення відносної точності прогнозу при переході від довгострокового до короткострокового прогнозу можна пояснити наступним чином: на більших проміжках часу краще виділяються статистичні закономірності, ніж на менших. Відповідно, функціонування нейронної мережі на менш зашумлених даних (для великих проміжків часу) є кращим. Порівняння нейромережевого прогнозу з реальними спостереженнями наведено на рис. 4.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано автоматичну систему для прогнозування ударних хвиль у сонячному вітрі. Система складається з трьох окремих модулів: модуля ідентифікації початку УХ, модуля класифікації типу УХ та модуля прогнозу часу прибуття УХ. Усі три модулі були орієнтовані на використання даних інструмента EPAM супутника ACE та верифіковані на незалежних даних ІЗМІРАН про надзвичайні події у сонячному вітрі.

Експерименти показали, що запропонований підхід точніший, ніж існуючі моделі. Оптимізований алгоритм визначення початку УХ дозволяє визначати 89 % УХ, що втричі перевищує результати відомої моделі [19]. Модуль класифікації УХ дозволяє розділяти небезпечні та безпечні УХ з точністю 91 %. Для прогнозу часу прибуття була використана простіша нейронна мережа прямого поширення. Середня похибка прогнозу за 24 год до прибуття УХ склала 6.23 год, а за 12 год — 2.79 год, що також значно краще, ніж результати моделі [19], адже на 24 год її середня похибка складає 8 год, а на 12 — цілих 6 год. Таким чином, запропонована система забезпечує точніший прогноз порівняно з моделлю [19] при використанні простіших прогнозних моделей.

Результати роботи представлені у вигляді сервісу на порталі «Космічна погода» (<http://www.spaceweather.org.ua>), який створено під егідою Національного космічного агентства України.

1. Архів даних першого рівня супутника ACE.— <http://sohowww.nascom.nasa.gov/sdb/ace/daily>.
2. Дані першого рівня супутника ACE у режимі реального часу.— <http://www.sec.noaa.gov/ftpdir/lists/ace>.
3. Класифікація подій космічної погоди NOAA.— <http://www.sec.noaa.gov/NOAAAscales>.
4. Перелік ударних хвиль за 1997—2006 роки (ІЗМІРАН).— <http://helios.izmiran.troitsk.ru/cosray/events.htm>.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006.—940 с.
6. Шелестов А. Ю., Житомирская К. Г., Кременецкий И. А., Ильин Н. И. Автоматическое выявление ударных волн по измерениям спутника ACE // Кибернетика и вычислительная техника.—2006.—№ 151.— С. 3—16.
7. Blais G., Metsa P. Operating the Hydro-Quebec grid under magnetic storm conditions since the storm of March 13, 1989 // Proc. Solar-Terrestrial Predictions Workshop, Ottawa, May 18–22, 1992 / Eds J. Hruska, M. A. Shea,

- D. F. Smart, G. Heckman. — Boulder, USA: NOAA 1993.—Vol 1.—P. 108—130.
- Boaghe O. M., Balikhin M. A., Billings S. A., Alleyne H. Identification of nonlinear processes in the magnetospheric dynamics and forecasting of Dst index // J. Geophys. Lett.—2001.—106.—P. 30047—30066.
- Cole D. G. Space weather: Its Effects and Predictability // Space Sci. Rev.—2003.—N 107.—P. 295—302.
- Doherty P., Coster A. J., Murtagh W. Space weather effects of October–November 2003 // GPS Solutions.—2004.—8.—P. 267—271.
- Dryer M., Smart D. F. Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances // Adv. Space Res.—1984.—4.—P. 291—301.
- Fry C. D., Sun W., Deehr C. S., et al. Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions // J. Geophys. Res.—2001.—106, N A10.—P. 20985—21002.
- Igel C., Husken M. Improving the Rprop learning algorithm // Proceedings of the Second International Symposium on Neural Computation / Eds H. Bothe, R. Rojas. — ICSC Academic Press, 2000.—P. 115—121.
- Leontaritis I. J., Billings S. A. Model Selection and Validation Methods for Nonlinear Systems // Int. J. Control.—1987.—45.—P. 311—341.
- Riedmiller M., Braun H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm // Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Neural Networks. — San Francisco, USA., 1993.—P. 586—591.
- Riley P., Linker J., Mikic Z., Lionello R. MHD modeling of the solar corona and inner heliosphere: Comparison with observations // Space Weather: Geophys. Monogr. Ser. / Eds P. Song, H. J. Singer, G. L. Siscoe.—2001.—125.—159 p.
- Smart D. F., Shea M. A. A simplified model for timing the arrival of solar-are-initiated shocks // J. Geophys. Res.—1985.—90.—P. 183—190.
- Smith Z. K., Dryer M., Ort E., Murtagh W. Performance of interplanetary shock prediction models // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2000.—62.—P. 1264—1274.
- Vandegriff J., Wagstaff K., Ho G., Plauger J. Forecasting space weather: Predicting interplanetary shocks using neural networks // Adv. Space Res.—2005.—36.—P. 2323—2327.

FORECASTING SPACE WEATHER: AUTOMATIC SYSTEM FOR INTERPLANETARY SHOCKS PREDICTION

*N. N. Kussul, A. Yu. Shelestov, S. V. Skakun,
K. G. Zhytomirska*

We describe the automatic system for interplanetary (IP) shocks prediction using observations from the EPAM instrument onboard the ACE satellite. The proposed three-module cascade system architecture consists of IP shock onset detection module and two neural networks modules for dangerous IP shock type prediction and IP shock arrival time prediction. The proposed approach was verified on historical data of IP shocks for last solar cycle maximum (in 2000) that included both minor and moderate IP shocks and outperformed existing models.

УДК 550.38

А. С. Парновский

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Київ

Прогнозирование D_{st} -индекса методом линейного регрессионного анализа

Надійшла до редакції 09.08.07

Метою роботи є побудова феноменологічної регресійної залежності D_{st} -індексу від параметрів сонячного вітру і використання цієї залежності для прогнозування. Магнітосфера розглядається як чорний ящик, тобто не використовуються жодні моделі або припущення. В роботі отримана залежність, що забезпечує прогнозування D_{st} -індексу на 9 годин вперед. При цьому коефіцієнт кореляції регресійного значення D_{st} з вимірюванням складає від 98.6 % при прогнозуванні на 1 годину до 79.3 % при прогнозуванні на 9 годин. У роботі також обговорюється, як вигляд статистично значущих регресорів може сприяти розумінню фізичного механізму впливу параметрів сонячного вітру на геомагнітну активність.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование космической погоды является одной из основных задач современных космических исследований. Одной из ее важнейших подзадач является прогнозирование геомагнитной активности на поверхности Земли, так как именно она определяет влияние космической погоды на самочувствие людей, качество радиосвязи, работоспособность линий электропередачи и многие другие области современной жизни. На сегодняшний день есть несколько количественных показателей геомагнитной активности, самыми распространеными из которых являются шторм-тайм-вариация геомагнитного поля D_{st} и планетарный индекс геомагнитной активности K_p . Для прогнозирования геомагнитной активности индекс D_{st} более удобен, так как непосредственно отображает вариацию магнитного поля на поверхности Земли в нанотесла, в то время как индекс K_p является интегральным и более искусственным, поскольку является балльной характеристикой степени возмущенности магнитного поля (в этом смысле он схож с магнитудой землетрясений по шкале Рихтера). Кроме того, в используемых нами данных ряд

измерений D_{st} непрерывен с 1 января 1963 г. до 30 апреля 2006 г., в то время как ряд измерений K_p содержал разрывы. Подробнее с определением и методикой измерения D_{st} -индекса можно ознакомиться в работах [1, 3, 6]. Следует отметить, что предсказанием геомагнитной активности по параметрам солнечного ветра занимались и ранее [2, 5—7].

Целью работы является прогнозирование D_{st} -индекса без использования каких-либо физических моделей или предположений на основе спутниковых данных 1-ч разрешения о параметрах солнечного ветра, перечисленных ниже. Для этого мы воспользуемся стандартным хорошо зарекомендовавшим себя методом линейного регрессионного анализа. В рамках этого метода прогнозируемое значение D_{st} можно представить в виде

$$D_{st}(j) = \sum_i C_i x_i(j),$$

где j — текущий шаг (количество часов с 1 января 1963 г.), C_i — коэффициенты регрессии, а $x_i(j)$ — регрессоры, являющиеся функциями входных величин или их комбинаций. Значения коэффициентов C_i определяются по методу наи-

меньших квадратов (МНК) с единичными статистическими весами всех точек, а значимость регрессоров — по методу Фишера.

Во многих работах по предсказанию геомагнитной активности используется лишь один входной параметр — электрическое поле утровечер (vB_z). Забегая наперед, отметим, что соответствующая ему группа регрессоров действительно является наиболее статистически достоверной после предыдущих значений D_{st} , однако использование регрессии, содержащей только эти величины, приводит к существенно худшим результатам, чем при использовании нескольких входных параметров. Во многих работах также используются подходы, связанные с нейронными сетями. Хотя эти методы по сложности значительно превосходят метод линейного регрессионного анализа, но также обеспечивают лишь кратковременный прогноз (например, 4 ч в работе [6]). Кроме того, в ряде случаев эти методы испытывают значительные сложности при предсказании интенсивных бурь с $K_p > 5$, которые характеризуются резким глубоким падением D_{st} -индекса. Метод линейного регрессионного анализа при большей простоте лишен этого недостатка, и в нашем случае обеспечивает уверенное прогнозирование геомагнитной активности на глубину до 9 ч.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве входных данных использовалась база данных OMNI 2, созданная в Национальном центре научных космических данных NSSDC (США), и доступная по адресу <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>. Она содержит усредненные на 1-ч интервале значения межпланетного магнитного поля, параметры плазмы солнечного ветра и потоки энергетических частиц, измеренные различными КА в точке Лагранжа между Землей и Солнцем и пересчитанные в баллистическом приближении на магнитопаузу, а также индексы геомагнитной и солнечной активности, измеренные на поверхности Земли (всего 49 параметров начиная с 1963 г.).

На рис. 1 представлена временная развертка D_{st} -индекса за 43 года наблюдений (с 1963 по 2005 гг.). Отчетливо видно, что нижняя огибающая графика, соответствующая наиболее мощ-

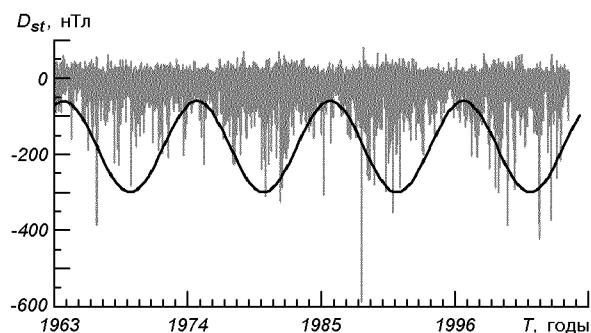


Рис. 1. Вариации индекса D_{st} за 1963—2006 гг. Жирная линия — синусоида с периодом 11 лет

ным геомагнитным бурям (напомним, что возмущения геомагнитного поля тем больше, чем меньше D_{st}), воспроизводит 11-летний солнечный цикл. Если построить этот же график в более крупном масштабе, можно будет увидеть, что средний уровень D_{st} колеблется с периодом, близким к периоду обращения Солнца 27 сут. Все это указывает на правильность выбора D_{st} -индекса в качестве характеристики геомагнитной активности.

К сожалению, в базе данных OMNI 2 были участки пропусков данных. Поэтому нам пришлось отбросить эти участки, называемые далее выбросами. Конкретная процедура их отбрасывания приведена ниже.

МЕТОДИКА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В отличие от некоторых других работ по прогнозированию геомагнитной активности, мы строим не степенную регрессию от одного входного параметра, а регрессию от большого количества входных параметров и их комбинаций, в том числе нелинейных. Используя прямой метод вычисления коэффициентов регрессии без ортогонализации входных параметров, мы можем сохранить их физический смысл и, таким образом, получить оценки геоэффективности различных физических параметров и их комбинаций.

Отбор регрессоров производился с учетом корреляционных функций различных параметров и известных моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой (например, электриче-

ское поле утро-вечер). Первоначальное количество регрессоров бралось заведомо избыточным, чтобы отбор по методу Фишера выделил из них наиболее статистически существенные. Для прогнозирования на различное количество часов вперед набор регрессоров получался независимо. При этом использовались все данные за 43 года, за исключением тех, где отсутствовали данные либо по D_{st} , либо по одному из параметров, входящих в регрессию. Качество полученного прогноза оценивалось по среднему квадратичному отклонению предсказанного значения от измеренного и по коэффициенту корреляции между этими двумя величинами. При прогнозировании на 1 ч среднее квадратичное отклонение составило около 3.75 нТл (0.56 % от размаха колебаний D_{st} , равного 670 нТл), а при устремлении времени прогнозирования к бесконечности оно сравняется со стандартным отклонением выборки, равным 24 нТл (3.58 % от размаха). Предсказанное значение при этом будет соответствовать среднему значению по выборке ($D_{st} = -17.89$ нТл). Среднее квадратичное отклонение, среднее между этими двумя предельными значениями, соответствует глубине прогнозирования 9 ч (рис. 2). Именно это значение характеризует характерную глубину прогнозирования по данному методу.

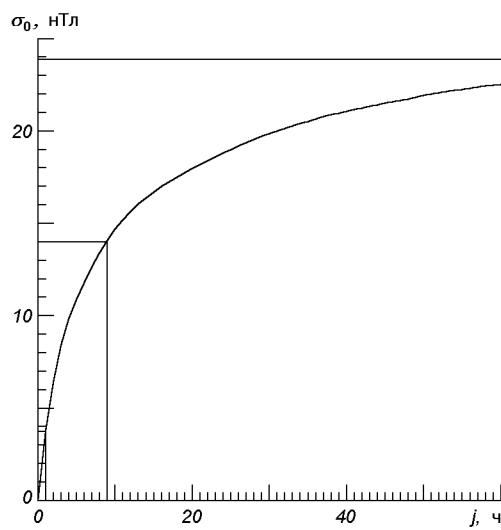


Рис. 2. Зависимость стандартного отклонения σ_0 остатков регрессии от глубины прогнозирования

При получении набора статистически достоверных регрессоров мы начали с исходного большого числа регрессоров. После обработки данных по МНК для каждого из регрессоров определялся параметр F , характеризующий значимость по тесту Фишера. Эти параметры сравнивались со значениями 2.7055, 3.84, 5.02, 6.635, 7.879, 10.83 и 12.1, соответствующими уровням статистической значимости 10, 5, 2.5, 1, 0.5, 0.1 и 0.05 %. Максимальное значение коэффициента Фишера составило $1.5 \cdot 10^5$ для регрессора, соответствующего значению D_{st} 1 ч назад при прогнозировании на 1 ч вперед. После отбрасывания несущественных регрессоров процедура повторялась до тех пор, пока не получался нужный набор. Окончательное количество регрессоров зависело от принятого минимального уровня достоверности. Повышенная уровень достоверности, мы получаем меньшее число регрессоров, каждый из которых заведомо статистически существен. Параметры регрессионной зависимости (1) для прогнозирования на 1 ч вперед приведены в таблице. Отметим, что в отличие от работы [6] мы не вводим подгоночных параметров, и все используемые регрессоры имеют очевидный физический смысл.

Обратим внимание, что эту процедуру необходимо применять к большой выборке. В качестве эксперимента мы провели эту процедуру для выборок, соответствующих отдельным годам. В них появлялись новые статистически существенные для конкретного года регрессоры, не существенные ни на большом интервале, ни для других годов. Они, по-видимому, связаны с конкретной фазой 11-летнего цикла и другими особенностями года, для которого они были построены. Также были случаи, когда существенность регрессора в большой выборке, понижалась при переходе к отдельным годам. Мы обнаружили, что для построения регрессии вполне достаточно использовать 22-летнюю выборку: коэффициенты, полученные для интервала 1963—1984 гг., использованы для прогнозирования на интервале 1985—2006 гг. По сравнению с полной выборкой коэффициент корреляции при прогнозировании на 1 ч понизился с 98.7 до 98.6 %, а при прогнозировании на 9 ч — с 79.8 до 79.3 %. Для сравнения в работе [6] при использовании данных с лучшим временным разрешением при прогнозировании на время распространения воз-

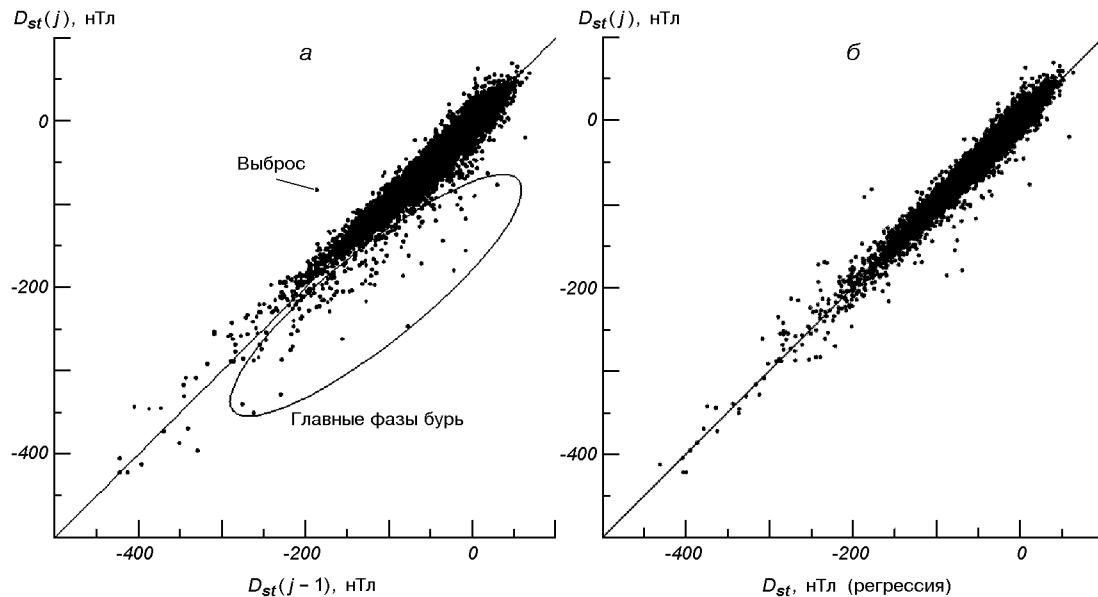


Рис. 3. Зависимость измеренных значений $D_{st}(j)$: *a* — от предсказанных значений $D_{st}(j-1)$ в простейшей модели с глубиной предсказания 1 ч, *б* — от предсказанных значений D_{st} в полной модели с глубиной предсказания 1 ч

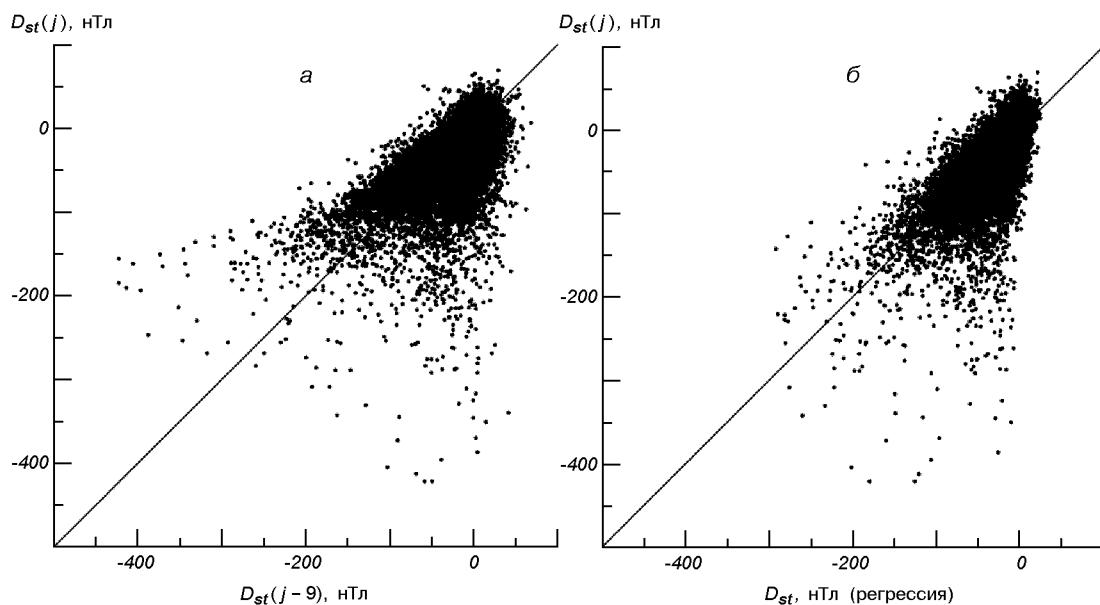


Рис. 4. То же для моделей с глубиной предсказания 9 ч

мущений от орбиты спутника до Земли (десятки минут) за 1995—1999 гг. получена зависимость, обеспечивающая линейную корреляцию 93.9 % и среднее квадратичное отклонение 6.4 нТл, а за первую половину 2000 г. — линейную корре-

ляцию 95 % и среднее квадратичное отклонение 7.9 нТл.

Отметим, что достоверность постоянного регрессора увеличивается с увеличением глубины прогнозирования, а достоверность регрессора,

Коэффициенты регрессии при прогнозировании на 1 час вперед. Минимальный уровень статистической достоверности регрессоров — 90 % ($F > 2.7055$), среднее квадратичное отклонение — 3.76 нТл, объем выборки — 139692 точки, коэффициент корреляции — 98.7 %

i	c_i	Δc_i	F	x_i
1	0.115555E+01	0.287866E-02	0.161137E+06	$D_{st}(j-1)$
2	-0.299802E+00	0.436327E-02	0.472112E+04	$D_{st}(j-2)$
3	0.690698E-01	0.437462E-02	0.249285E+03	$D_{st}(j-3)$
4	-0.737033E-02	0.318689E-02	0.534734E+01	$D_{st}(j-4)$
5	0.158539E-01	0.291081E-02	0.296649E+02	$D_{st}(j-7)$
6	0.182679E-01	0.236903E-02	0.594585E+02	$D_{st}(j-8)$
7	0.113505E-02	0.300712E-04	0.142473E+04	$B_z(j-1) \cdot v(j-1)$
8	-0.871260E-03	0.120588E-04	0.522020E+04	$B_z(j-2) \cdot v(j-2)$
9	-0.249543E-01	0.398636E-03	0.391867E+04	$B_z^2(j-1)$
10	-0.175310E+00	0.136431E-01	0.165114E+03	$ B ^1(j-1)$
11	0.589849E-01	0.160058E-01	0.135818E+02	$ B ^1(j-3)$
12	-0.142064E+00	0.208747E-01	0.463169E+02	$ B ^1(j-6)$
13	0.115483E+00	0.208237E-01	0.307497E+02	$ B ^1(j-7)$
14	-0.651049E-01	0.206890E-01	0.990531E+01	$ B ^1(j-10)$
15	0.449028E-01	0.192162E-01	0.545848E+01	$ B ^1(j-11)$
16	0.317899E-01	0.843823E-02	0.141955E+02	$ B ^1(j-20)$
17	-0.199444E-02	0.554909E-03	0.129226E+02	$ B ^2(j-1)$
18	0.111616E-01	0.521612E-03	0.457888E+03	$ B ^2(j-2)$
19	-0.379923E-02	0.671470E-03	0.320156E+02	$ B ^2(j-3)$
20	-0.440797E-02	0.415798E-03	0.112387E+03	$ B ^2(j-4)$
21	0.841704E-02	0.705181E-03	0.142467E+03	$ B ^2(j-6)$
22	-0.782535E-02	0.777916E-03	0.101186E+03	$ B ^2(j-7)$
23	0.287269E-02	0.520874E-03	0.304134E+02	$ B ^2(j-8)$
24	-0.147823E-02	0.524860E-03	0.793590E+01	$ B ^2(j-9)$
25	0.614276E-02	0.767092E-03	0.641318E+02	$ B ^2(j-10)$
26	-0.240567E-02	0.655135E-03	0.134852E+02	$ B ^2(j-11)$
27	0.251051E-02	0.386572E-03	0.421782E+02	$ B ^2(j-15)$
28	-0.358427E-02	0.520243E-03	0.474631E+02	$ B ^2(j-16)$
29	0.314027E-02	0.515821E-03	0.370644E+02	$ B ^2(j-17)$
30	-0.138873E-02	0.413629E-03	0.112727E+02	$ B ^2(j-18)$
31	-0.141097E-02	0.353481E-03	0.159300E+02	$ B ^2(j-20)$
32	0.425745E+00	0.143661E-01	0.878246E+03	$B_z(j-1)$
33	-0.189150E+00	0.189042E-01	0.100114E+03	$B_z(j-3)$
34	0.433738E-01	0.216148E-01	0.402906E+01	$B_z(j-4)$
35	-0.963558E-01	0.215678E-01	0.199564E+02	$B_z(j-5)$
36	0.775695E-01	0.176548E-01	0.193025E+02	$B_z(j-6)$
37	0.116744E+00	0.451274E-02	0.669242E+03	$n_i(j-1)$
38	-0.961877E-02	0.315033E-02	0.932420E+01	$v(j-2)$
39	0.156108E-01	0.358553E-02	0.189546E+02	$v(j-3)$
40	-0.776699E-02	0.193840E-02	0.160545E+02	$v(j-6)$
41	-0.172396E-04	0.683267E-06	0.636608E+03	$v(j-1)^2$
42	0.230969E-04	0.298000E-05	0.600727E+02	$v(j-2)^2$
43	-0.142711E-04	0.333875E-05	0.182716E+02	$v(j-3)^2$
44	0.893491E-05	0.182477E-05	0.239719E+02	$v(j-6)^2$

Окончание таблицы

i	C_i	ΔC_i	F	x_i
45	-0.855826E+00	0.167418E-01	0.261317E+04	$p(j-1)$
46	0.268689E+00	0.183159E-01	0.215198E+03	$p(j-2)$
47	-0.783364E-01	0.182902E-01	0.183477E+02	$p(j-3)$
48	-0.721052E-01	0.175859E-01	0.168108E+02	$p(j-4)$
49	0.557193E-01	0.164529E-01	0.114670E+02	$p(j-5)$
50	0.117062E+00	0.167627E-01	0.487684E+02	$p(j-6)$
51	-0.749044E-01	0.141459E-01	0.280377E+02	$p(j-7)$
52	-0.579183E-01	0.140430E-01	0.170078E+02	$p(j-9)$
53	0.426967E-01	0.126796E-01	0.113344E+02	$p(j-10)$
54	0.457738E-01	0.128966E-01	0.126012E+02	$p(j-15)$
55	-0.572935E-01	0.169735E-01	0.113934E+02	$p(j-16)$
56	0.353073E-01	0.133981E-01	0.694885E+01	$p(j-17)$
57	0.160221E-01	0.807798E-02	0.393141E+01	$p(j-20)$
58	-0.182053E+00	0.390814E-01	0.216982E+02	$E(j-3)$
59	0.216142E+00	0.438804E-01	0.242601E+02	$E(j-4)$
60	-0.347304E+00	0.438600E-01	0.627032E+02	$E(j-5)$
61	0.138882E+00	0.361020E-01	0.148013E+02	$E(j-6)$
62	0.232382E+00	0.902961E-02	0.662319E+03	$E(j-8)$
63	0.134628E+01	0.207456E+00	0.421157E+02	1

описывающего последнее измеренное значение D_{st} , снижается. При прогнозировании на 1 ч соответствующие коэффициенты Фишера составляют 42 и $1.6 \cdot 10^5$ соответственно, а при прогнозировании на 9 ч — 1002 и 1482. Увеличение достоверности постоянного регрессора связано с тем, что при увеличении глубины прогнозирования регрессионное значение D_{st} стремится к среднему значению по выборке. Что же касается последнего измеренного значения D_{st} , то уменьшение его достоверности связано с его «устареванием» по мере увеличения глубины прогнозирования. Тем не менее, регрессия, состоящая из одного лишь этого регрессора, является простейшей моделью описания поведения D_{st} -индекса. Она соответствует предположению, что D_{st} -индекс не изменился по сравнению с последним измеренным значением. Уровень корреляции регрессионного значения D_{st} в этой модели является минимальным среди всех возможных моделей, поэтому о качестве модели можно судить по разности корреляций рассматриваемой и простейшей моделей. Для иллюстрации приведем рис. 3 и 4, на которых для

глубины прогнозирования в 1 и 9 ч соответственно по оси ординат отложены измеренные значения D_{st} , а по оси абсцисс — регрессионные. При этом рис. 3, *a* и 4, *a* соответствуют простейшей модели, а рис. 3, *б* и 4, *б* — полной. Видно, что полные модели обеспечивают заметно меньшие отклонения от измеренных значений. Кроме того, рис. 3, *a* очень удобен для анализа исходных данных. Точки, лежащие вблизи линии одинаковых значений, соответствуют спокойным состояниям магнитосферы. Точки, лежащие ниже этой линии, соответствуют главным фазам бурь. Точки, лежащие слегка выше диагонали, соответствуют восстановительным фазам бурь. Единственная точка, лежащая значительно выше, является выбросом, произошедшим 21 октября 1989 г. в 17:00.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Обсудим физический смысл наиболее существенных регрессоров. Максимальную достоверность имеет группа регрессоров $D_{st}(j-i)$, где j —

момент прогнозирования, i — количество шагов предыстории (см. таблицу). Они играют двоякую роль: с одной стороны, они задают предысторию поведения D_{st} , а с другой — неявно содержат в себе невязки модели в предыдущие моменты времени, вводя тем самым в модель некоторую коррекцию. Следующая по достоверности группа регрессоров — $v \times B_z(j - i)$. Это электрическое поле утро-вечер [1], наводимое солнечным ветром в магнитосфере. До настоящего времени этот параметр считался наиболее геоэффективным. Дальше идут регрессоры $B_z^2(j - 1)$ и $n_i(j - 1)$, а также группы регрессоров $p(j - i)$, $|B|^2(j - i)$ и $v^2(j - i)$. Эти регрессоры описывают полное давление солнечного ветра. Далее следуют южный компонент магнитного поля солнечного ветра $B_z(j - i)$, считавшийся наиболее геоэффективным параметром в теории Данжи [1, 4], электрическое поле солнечного ветра $E(j - i)$, скорость солнечного ветра $v(j - i)$ и модуль напряженности магнитного поля солнечного ветра $|B|(j - i)$. Кроме перечисленных, достоверен и постоянный регрессор.

Таким образом, в данной работе была получена регрессионная зависимость индекса D_{st} от параметров солнечного ветра вида (1), обеспечивающая его прогнозирование на несколько часов вперед. Характерная глубина прогнозирования — 9 ч. Коэффициент корреляции между регрессионным и измеренным значениями D_{st} при прогнозировании на 1 ч составил 98.6 %, а на 9 ч — 79.3 %. Регрессоры, входящие в указанную зависимость, были выбраны таким образом, что их статистическая достоверность, определенная по методу Фишера, составляла не менее 90 %. Физический смысл указанных регрессоров достаточно понятен: они описывают предысторию D_{st} , электрическое поле утро-вечер, полное давление солнечного ветра, а также скорость, электрическое поле, модуль и южный компонент магнитного поля. Отметим, что достоверность полного давления оказалась выше достоверностей скорости потока и южного компонента магнитного поля. Таким образом, по важности южный компонент магнитного поля уступает уже не только электрическому полю утро-вечер, но и полному давлению солнечного ветра, что идет в разрез с привычным представ-

лением о механизме развития геомагнитной бури [1, 4], где она играет определяющую роль.

Разработанный автором по результатам данной работы программный код, позволяющий предсказывать D_{st} -индекс на 9 ч вперед, загружен на сайт <http://www.spaceweather.org.ua/>, и в ближайшее время будет готов к использованию.

Автор благодарит О. К. Черемных за постановку задачи, В. М. Кунцевича, Ю. А. Селиванова, В. А. Яценко и других сотрудников ИКИ НАНУ и НКАУ за обсуждение результатов и ценные замечания.

1. Акасоfu C.-I., Чепмен С. Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1975.—900 с.
2. Baker D. N., Klimas A. J., McPherron R. L., Buchner J. The evolution from weak to strong geomagnetic activity: An interpretation in terms of deterministic chaos // Geophys. Res. Lett.—1990.—17.—P. 41—44.
3. Campbell W. H. Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distributions // J. Atmos. and Terr. Phys.—1996.—58, N 10.—P. 1171—1187.
4. Dungey J. W. Interactions of solar plasma with the geomagnetic field // Planet. Space Sci.—1963.—10.—P. 233—237.
5. Feldstein Y. I. Modelling of magnetic field of magnetospheric ring current as function of interplanetary medium parameters // Space Sci. Rev.—1992.—59.—P. 83—105.
6. Temerin M., Xinlin Li. A new model for the prediction of D_{st} on the basis of the solar wind // J. Geophys. Res.—2002.—107, N A12.—P. SMP 31-1.
7. Wu J.-G., Lundstedt H. Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A7.—P. 14255—14268.

D_{st} PREDICTION USING THE LINEAR REGRESSION ANALYSIS

A. S. Parnowski

The aim of our investigation is to derive the phenomenological regression of D_{st} in relation to solar wind parameters and to use the regression for D_{st} prediction. The magnetosphere is considered as a black box, i.e., no models or assumptions are used. We derived the regression providing predicting D_{st} for nine hours ahead. The correlation between predicted and measured D_{st} values varies from 98.6 % for one-hour prediction to 79.3 % for nine-hour prediction. We also discuss how the form of statistically significant regressors can help understanding the physical mechanism of solar wind influence on geomagnetic activity.

УДК 528.8.04:551.4

В. І. Лялько, З. М. Шпорюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» для класифікації земного покриву

Надійшла до редакції 26.07.07

Наведено результати попередніх досліджень можливості використання індексів червоного краю та водних індексів для класифікації земного покриву за даними сенсора EO-1 «Hyperion». Використано космознімки території Києва та області від 14.09.2002 р., на основі яких побудовано зображення індексів REP, NDVI та HTCI, а також водних індексів LWI, NWI та SMI, які надалі використано для класифікації земного покриву. Результати досліджень показали, що класифікація рослинного покриву з використанням сукупності множин індексів дає кращий результат, ніж з використанням коефіцієнтів відбиття або окремих індексів. Це свідчить про високий потенціал використання комбінацій індексів червоного краю для моніторингу стану рослинного покриву.

ВСТУП

«Hyperion» — перший в світі гіперспектральний відеоспектрометр, встановлений на борту супутника EO-1, запущеного NASA 21 березня 2000 р. Він має 220 спектральних каналів в діапазоні $\lambda = 400\text{--}2500$ нм. Спектральна розрізненість його каналів в оптичному та близькочервоному (NIR) діапазонах становить 10 нм, а просторова — 30 м для всіх каналів. Ширина стандартної сцени зйомки 7.7 км, довжина — 42 км [16]. Висота його орбіти складає 705 км, як і орбіта «Landsat-7».

Із запуском на орбіту гіперспектрального супутникового сенсора стала реальною можливість отримання спектрів відбиття високої спектральної розрізненості в області червоного краю (660—780 нм) для рослинного покриву та використання цих даних для класифікації стану

рослинності на основі попіксельного обчислення індексів червоного краю. Серед цих індексів — позиція червоного краю REP (Red Edge Position); нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI та його модифікації mNDVI. Побудова зображень цих індексів за космознімком конкретної території відкриває нові можливості для розрізнення, ідентифікації, картування, моніторингу та аналізу стану рослинного покриву Землі.

Основою для методики аналізу стану рослинного покриву через дослідження індексів червоного краю його спектрів відбиття є спектральні властивості рослинного покриву в цій області, встановлені на основі даних лабораторних, польових та аерогіперспектральних зйомок.

Встановлено, що у спектральній смузі $\lambda = 670\text{--}780$ нм спектри відбиття листя здорового рослинного покриву характеризуються високими

значеннями коефіцієнтів відбиття, великою швидкістю зміни цих коефіцієнтів та різними значеннями REP для різних видів рослинності. Ця спектральна властивість рослинності створює можливість використання значення REP для розрізнення та класифікації рослинного покриву Землі за даними гіперспектральної космозйомки. Перші кроки в цьому напрямку з використанням даних відеоспектрометра ENVISAT MERIS зроблено в дослідженнях вчених Великобританії [8], Нідерландів [5] та України [2, 18]. Дослідження стану рослинного покриву лісів на основі індексів червоного краю, обчисленіх за даними EO-1 «Hyperion» проведено вперше в роботі [17], де встановлено зв'язок між позицією червоного краю та листовим площовим індексом для лісів Патагонії (Аргентина).

Другою важливою спектральною особливістю червоного краю для спектрів одного і того ж виду рослинності є те, що нахил спектральної кривої і позиція червоного краю змінюються під впливом змін вмісту хлорофілу в рослинах на проміжку часу від початку активного фотосинтезу і появи паростків аж до старіння рослини. Така інформація про зміни REP при зміні фенологічного стану чи стану здоров'я рослини є найбільш важливим аспектом визначення вегетаційних стресів. Вегетаційні стреси, викликані різними чинниками, які призводять до зменшення вмісту хлорофілу, проявляються у спектрах відбиття рослин зсувами REP до коротких довжин хвиль — «голубий зсув». Дослідження багатьох вчених підтвердили, що «голубий зсув» REP — це універсальний відгук на вегетаційний стрес, який може бути спричинений хворобами рослин та несприятливими екологічними умовами [1, 6, 12].

Зсув REP в спектрах відбиття рослинного покриву в довгохвильовому напрямку, так званий «червоний зсув», виникає із збільшенням вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних стадіях їхнього розвитку від початку вегетаційного росту до цвітіння. Можливість ідентифікації видів рослинних спільнот за величиною REP та зміни REP внаслідок вегетаційних стресів, викликаних геохімічними стресами, забрудненням довкілля, пошкодженням рослин шкідниками та внаслідок аварій, захворюваннями, тощо свідчать про потенційну можливість використання REP для аналізу стану рослинного

покриву Землі за даними гіперспектральної космозйомки.

Великою перевагою гіперспектральних даних є те, що вони дають можливість попіксельного обчислення REP (при наявності відповідної методики) для космознімка конкретної території і побудови REP-зображені рослинного покриву цієї території. Класифікація таких зображень дасть можливість виявляти «голубі» чи «червоні» зсуви REP, і таким чином здійснювати аналіз стану рослинного покриву Землі як у регіональному, так і в глобальному масштабі.

У роботі [8], присвяченій обробці гіперспектральних даних космозйомки відеоспектрометра MERIS, використано зв'язок випромінювання червоного та NIR-діапазону, які відповідають 8-му, 9-му та 10-му спектральним каналам MERIS, із вмістом хлорофілу в рослинному покриві та запропоновано новий вегетаційний індекс MTCI (мерісівський наземний хлорофільний індекс). Встановлено, що індекс MTCI чутливіший, ніж індекс REP, до змін хлорофілу при високих рівнях вмісту хлорофілу в рослинному покриві. Використувались наземні польові спектрорадіометричні дані та дані відеоспектрометра MERIS для тестових ділянок на території Великобританії. Показано можливість побудови REP- та MTCI-зображень конкретної території на прикладі космознімка ENVISAT MERIS та використання цих зображень для класифікації рослинного покриву Землі. Ми пропонуємо новий вегетаційний індекс для даних «Hyperion», який ми назвали HTCI, і розглядаємо нижче можливість його використання при дослідженні рослинного покриву.

Відзначимо, що подібні дослідження проведенні в ЦАКДЗ [2, 18], де вперше дані космознімки ENVISAT MERIS використано для класифікації наземного покриву Карпат. Таким чином, дані гіперспектральних супутникових сенсорів із високою спектральною розрізненістю в області червоного краю забезпечують величезний потенціал для розрізнення, ідентифікації, картування, моніторингу та аналізу стану рослинного покриву Землі з використанням позиції червоного краю та побудови REP-зображень рослинного покриву для заданих моментів часу протягом року, від появи перших паростків навесні до відмиралня восени. Такі масиви багаточасових REP-зображень для однієї і тієї ж території

створять основу для моніторингу та аналізу стану рослинного покриву і дозволяють оперативно визначати ділянки вегетаційного стресу і зони ураження лісів шкідниками (наприклад, сосновим шокопрядом та кореневою губкою [1, 3, 7, 15]), у місцях екологічних катастроф, небезпечних для життя людини.

Поряд з вегетаційними індексами червоного краю, які відображають стан рослинного покриву, все більшого використання набувають так звані водні індекси, які характеризують зволоженість земного покриву, вміст вологи в верхньому шарі ґрунту та вміст вологи у рослинному покриві [4, 9, 13, 14, 19–21]. Дані сенсора «Hyperion» дозволяють попіксельно обчислювати значення водних індексів і мати принципово нові характеристики земного покриву для оцінки його екологічного стану [10]. Зокрема, за даними «Hyperion» можна обчислювати такі водні індекси [10]:

- індекс LWI зволоженості рослинного покриву (the liquid water index), що використовує різницю спектрального відбиття на довжинах хвиль λ 1100 та 2200 нм,
- індекс SMI вологості ґрунту (the soil moisture index), який обчислюється як відношення середнього спектрального відбиття в діапазоні $\lambda\lambda = 1550–1750$ нм до середнього відбиття в діапазоні $\lambda\lambda = 2080–2350$ нм.

Ми запропонували індекс NWI (the normalized water index) для оцінки зволоженості земного покриву [4], який у роботі [10] використано для ідентифікації снігового покриву і названо NDSI (the normalized difference snow index). Але нами встановлено, що використання нормованої різниці спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектру дозволяє ефективно виконувати оцінку вмісту вологи як в рослинному покриві, так і у верхньому шарі відкритого ґрунту [4].

ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ ЗА ДАНИМИ СЕНСОРА EO-1 «HYPERION»

Гіперспектральні зображення, як і багатоканальні, можуть бути піддані спектральним перетворенням, які породжують нові множини зображень. Такі трансформовані зображення мо-

жуть зробити помітними особливості (характеристики), які погано розпізнаються на оригінальному зображенні, чи підкresлити суттєвий інформаційний зміст зображення, використовуючи дані меншої кількості спектральних каналів, які належать не всій спектральній області, а лише деякій її підмножині. Для спектрів відбиття рослинного покриву такою інформацією підмножиною є область червоного краю, для якої наведено формули деяких вегетаційних індексів з використанням даних сенсора EO-1 «Hyperion».

Обчислення REP. За означенням, REP — довжина хвилі із інтервалу 680–760 нм, на якій швидкість зміни спектру відбиття рослинності досягає максимуму. Вперше визначення індексів червоного краю за даними EO-1 «Hyperion» здійснено в роботі [17]. Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції REP EO-1 «Hyperion» визначається за формулами [17]

$$\text{REP} = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R(701.55)}{R(742.25) - R(701.55)}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671.02) + R(782.95)}{2},$$

де $R(\lambda)$ — коефіцієнт відбиття на довжині хвилі λ [10].

Обчислення HTCI. Одним із нових вегетаційних індексів, які використовують значення коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль із області червоного краю, є індекс HTCI (the Hyperion Terrestrial Chlorophyl Index) — аналог наземного хлорофільного індекса MTCI (the MERIS Terrestrial Chlorophyl Index). Індекс HTCI — це відношення різниці коефіцієнтів відбиття в 40-му і 36-му каналах до різниці коефіцієнтів відбиття в 36-му і 33-му каналах сенсора EO-1 «Hyperion»:

$$\text{HTCI} = \frac{R(752.43) - R(711.72)}{R(711.72) - R(681.21)}. \quad (2)$$

В роботі [8] показано, що у випадку високих значень вмісту хлорофілу в рослинах MTCI більш чутливий до зміни хлорофілу, ніж REP, тобто при високих значеннях вмісту хлорофілу малим змінам значень REP відповідають значні зміни значень MTCI.

Обчислення NDVI. Розпізнавання стану рослинного покриву можна здійснювати за допомо-

гою нормалізованого різницевого вегетаційного індекса NDVI. Для даних EO-1 «Hyperion» цей індекс можна обчислювати за формулою [10]

$$\text{NDVI} = \frac{R(864.35) - R(671.02)}{R(864.35) + R(671.02)}. \quad (3)$$

Обчислення mNDVI. В роботі [2] для картування земного покриву за даними ENVISAT MERIS використано модифікований нормалізований вегетаційний індекс mNDVI, який, на відміну від NDVI, використовує значення коефіцієнтів відбиття в двох каналах із області червоного краю. Для даних EO-1 «Hyperion» цей індекс можна обчислити за формулою

$$\text{mNDVI} = \frac{R(752.43) - R(711.72)}{R(752.43) + R(711.72)}. \quad (4)$$

Обчислюючи значення індексів (1)–(4) для кожного піксела космознімка EO-1 «Hyperion» конкретної території, можна сформувати нові REP-, HTCI-, NDVI- та mNDVI-зображення, які можна використати для аналізу та картування наземного покриву.

Обчислення LWI. Формула розрахунку індексу зволоженості LWI буде аналогічно вегетаційному індексові NDVI. Але замість каналів у червоній та близькій інфрачервоній зонах спектру використовується відбиття у каналах з довжиною хвилі приблизно 1100 та 2200 нм. Для даних EO-1 «Hyperion» формула для розрахунку LWI має вигляд

$$\text{LWI} = \frac{R(1104.18) - R(2203.83)}{R(1104.18) + R(2203.83)}. \quad (5)$$

Обчислення SMI. Для обчислення індексу вологості ґрунту SMI необхідно визначити середнє відбиття в діапазонах 1550–1750 нм та 2080–2350 нм. Для даних EO-1 «Hyperion» це означає усереднення значень R у 20 та 19 каналах відповідно. Значення індексу SMI обчислюється як відношення отриманих середніх значень [10]:

$$\text{SMI} = \frac{R(1558.12 \dots 1749.79)}{R(2082.75 \dots 2245.11)}. \quad (6)$$

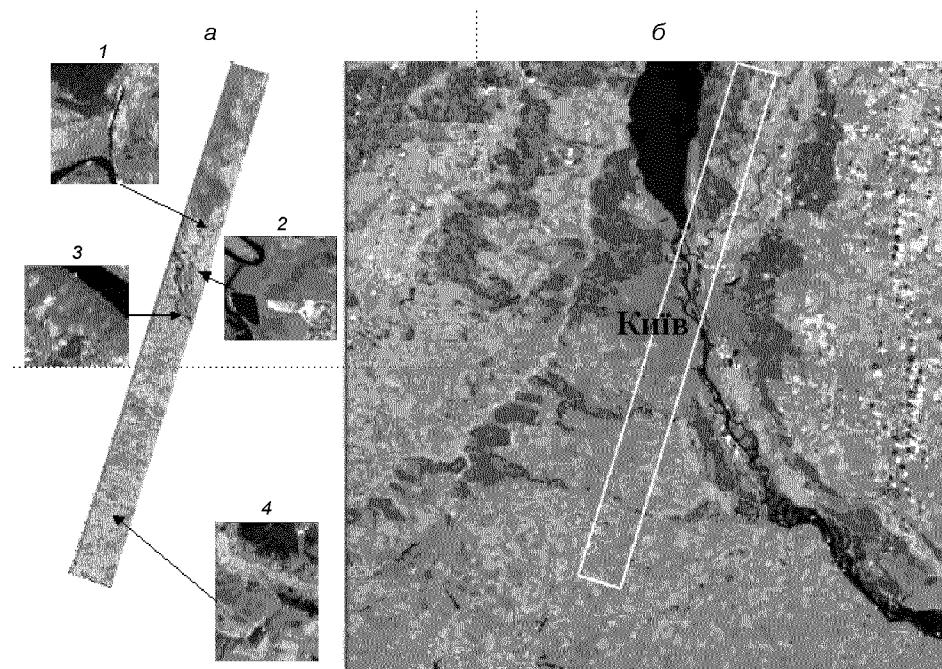


Рис. 1. Синтезоване зображення EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) у межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) та досліджувані фрагменти (а) і синтезоване зображення «Landsat» ETM (14.09.2001 р.) (синтез каналів 2, 4, 5) (б), де показано розташування знімка «Hyperion»

Мінімальні, максимальні та середні значення індексів червоного краю і водних індексів за даними EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) та «Landsat-7» ETM (14.09.2001 р.) для різних класів земного покриву

Номер п/п	Номер ділянки	Клас земного покриття	EO-1 «Hyperion»						«Landsat-7» ETM		
			NDVI	REP	HTCI	LWI	SMI	NWI	NDVI	SMI	NWI
1	1	Сосновий ліс	0.417	723.58	2.33	0.881	4.29	0.762	0.260	4.07	0.715
			0.504	725.91	3.28	0.954	5.87	0.819	0.471	5.92	0.799
			0.466	724.73	2.85	0.914	4.97	0.796	0.359	5.03	0.768
2	1	Водна поверхня	0.043	711.80	-27.66	0.828	3.70	0.826	-0.267	2.26	0.887
			0.167	723.88	8.38	0.974	6.69	0.953	-0.129	4.01	0.943
			0.069	718.27	2.82	0.908	4.94	0.919	-0.196	3.24	0.907
3	1	Луки	0.253	723.90	2.62	0.648	2.40	0.530	-0.00	3.36	0.523
			0.418	727.11	5.50	0.768	3.27	0.685	0.288	4.49	0.691
			0.348	725.53	3.38	0.710	2.77	0.604	0.136	3.92	0.604
4	1	Луки заболочені	0.380	722.85	1.56	0.775	3.47	0.621	0.100	3.72	0.565
			0.497	725.00	2.23	0.857	4.16	0.667	0.256	4.72	0.633
			0.430	724.00	1.92	0.815	3.87	0.644	0.202	4.21	0.600
5	2	Відкритий піщаний ґрунт	0.119	724.15	-139.57	0.610	2.15	0.597	-0.101	3.04	0.623
			0.203	733.96	25.14	0.689	2.47	0.740	-0.002	3.42	0.660
			0.178	730.35	-22.60	0.634	2.22	0.622	-0.081	3.15	0.647
6	2	Міські агломерації (новобудови, Троєщина)	0.124	725.83	-213.25	0.625	2.28	0.521	-0.139	2.87	0.529
			0.325	732.60	71.61	0.779	3.22	0.810	0.242	4.27	0.830
			0.239	728.85	1.25	0.709	2.61	0.685	0.048	3.52	0.678
7	2	Луки та чагарники на піщаних ґрунтах	0.484	721.90	1.41	0.826	3.93	0.585	0.296	4.85	0.534
			0.635	724.41	2.15	0.899	5.09	0.761	0.584	6.81	0.823
			0.592	723.12	1.9	0.868	4.64	0.625	0.454	5.54	0.599
8	3	Листяні деревостані у парковій зоні	0.520	726.01	2.91	0.899	4.95	0.689	0.322	4.75	0.607
			0.587	728.36	4.57	0.954	5.77	0.763	0.633	6.79	0.739
			0.559	727.21	3.78	0.921	5.35	0.735	0.486	5.67	0.663
9	3	Трав'яний покрив, стадіон «Динамо»	0.346	725.88	2.87	0.887	4.71	0.656	0.367	5.05	0.566
			0.634	726.05	4.88	0.911	5.02	0.669	0.655	7.13	0.690
			0.486	725.94	3.80	0.896	4.83	0.664	0.559	5.96	0.606
10	3	Міські агломерації (стара забудова у Печерському районі)	0.108	724.28	-36.26	0.578	2.08	0.730	-0.121	3.03	0.678
			0.420	727.95	18.64	0.801	3.19	0.813	0.280	4.13	0.787
			0.242	726.36	3.31	0.724	2.56	0.769	0.044	3.39	0.730
11	3	Водна поверхня, р. Дніпро	-0.056	717.73	-80.32	0.790	3.00	0.950	-0.272	2.34	0.880
			0.182	743.90	4.33	0.947	6.25	0.963	-0.134	4.09	0.949
			-0.007	726.72	-4.44	0.889	4.20	0.957	-0.211	3.18	0.909
12	4	Сосновий ліс	0.491	723.54	2.34	0.894	4.55	0.773	0.345	4.44	0.733
			0.528	725.75	2.97	0.936	5.43	0.803	0.449	6.28	0.785
			0.507	724.30	2.62	0.915	4.97	0.791	0.388	5.22	0.761
13	4	Листяний ліс	0.563	724.39	2.21	0.881	4.66	0.667	0.412	4.38	0.578
			0.636	726.62	3.66	0.941	6.37	0.783	0.612	7.40	0.765
			0.592	725.53	2.88	0.907	5.35	0.710	0.540	6.09	0.655
14	4	Відкритий ґрунт (стерня)	0.359	722.59	1.70	0.748	3.27	0.568	0.152	4.16	0.540
			0.384	724.30	2.11	0.775	3.46	0.597	0.227	4.90	0.596
			0.376	723.26	1.84	0.764	3.37	0.581	0.188	4.39	0.572
15	4	Водна поверхня, ставок	0.046	710.27	0.90	0.871	4.22	0.907	-0.452	2.61	0.807
			0.088	724.22	3.04	0.924	5.59	0.933	0.077	5.17	0.922
			0.069	714.14	1.54	0.911	4.74	0.927	-0.216	3.45	0.898
16	4	Луки заболочені	0.562	723.08	1.82	0.876	4.83	0.612	0.341	5.07	0.524
			0.657	726.68	3.16	0.932	5.74	0.687	0.522	6.74	0.652
			0.620	725.62	2.78	0.913	5.21	0.648	0.462	5.76	0.598

Розрахунок індексу SMI за даними «Landsat 7» ETM+ базується на каналах 5 та 7, що буде використано для зіставлення значень SMI за даними EO-1 «Hyperion» та «Landsat 7» ETM+ для окремих типів земного покриву.

Обчислення NWI. Обчислення запропонованого нами водного індексу NWI для оцінки зволоженості земного покриву, який в роботі [10] названо індексом NDSI, виконуються аналогічно NDVI та LWI з використанням відбиття у зеленій та середній інфрачервоній зонах спектру. Для даних EO-1 «Hyperion» формула набуває вигляду

$$NWI = \frac{R(559.09) - R(1648.91)}{R(559.09) + R(1648.91)}. \quad (7)$$

За даними попіксельного обчислення водних індексів за формулами (5)–(7) будується відповідні зображення.

ДЖЕРЕЛО ДАНИХ ТА МЕТОДИ

У цьому дослідженні використано зображення EO-1 «Hyperion» від 14 вересня 2002 р. (EO1H1810252002244110PZ). Дані рівня 1R — радіометрично кориговані. Конвертовані до формату ERDAS Imagine за допомогою програми ENVI. На рис. 1 наведено зображення досліджуваної території Києва та області. Ширина сцени приблизно 7.5 км, довжина — 94 км. Досліджувана територія розташована вздовж смуги, центральна лінія якої на півдні починається з точки з координатами $30^{\circ}21'35''$ с. д. та $50^{\circ}01'05''$ п. ш. і закінчується на півночі в точці з координатами $30^{\circ}43'00''$ с. д. та $50^{\circ}50'20''$ п. ш.

В межах сцени для дослідження виділено декілька ділянок, зокрема ділянки 1, 2, 3 та 4 (рис. 1). Це дозволило виконати аналіз діапазонів змін вегетаційних індексів за даними «Hyperion» для наступних різновидів рослинного покриву та земної поверхні. В межах ділянки 1 оцінено відбивні характеристики соснового лісу, луків, водної поверхні р. Десна. Друга ділянка включає намивні піщані утворення, сучасні забудови району Троєщина, заплавні луки та заболочені ділянки у заплаві р. Десни та водну поверхню р. Десна. В межах третьої ділянки досліджувались відбивні характеристики листяних порід дерев в межах паркової зони (район Маріїнського парку), а також міські агломерації

центральної частини Києва. У межах четвертої ділянки досліджувались відбивні характеристики сільськогосподарських угідь, масивів соснового та листяного лісу та заболочених ділянок вздовж р. Стужна біля с. Погреби Васильківського району. Відповідні зображення вегетаційних індексів червоного краю та водних індексів наведено на рис. 2—5, що дозволило визначити величини цих індексів для різних видів земного покриву (таблиця).

РЕЗУЛЬТАТИ

У таблиці показано діапазони змін індексів NDVI, REP, HTCI, LWI, SMI і NWI для різних земних покривів у межах досліджуваних ділянок. Зауважимо, що модифікований індекс mNDVI (4) на дослідних ділянках має просторовий розподіл, подібний до розподілу NDVI, але з вужчим діапазоном значень, і тому в подальших дослідженнях нами не використовувався. Отримані дані свідчать про суттєві відмінності значень індексів для різних видів земного покриву, що створює можливості для їхньої класифікації.

Індекси NDVI, SMI та NWI можна визначити також за даними «Landsat-7» ETM+ і зіставити їх з даними EO-1 «Hyperion». У таблиці наведено значення індексів NDVI, SMI, NWI за даними «Landsat-7» (14.09.2001 р.) для однакових ділянок земного покриву, що використовувались для зіставлення з відповідними індексами для даних EO-1 «Hyperion». Зіставлення значень індексів показало незначні розбіжності. Значення NDVI за даними «Landsat» менші, але загальні закономірності і тенденції зміни цього індексу зберігаються. Певні розбіжності є у значеннях SMI і NWI, та вони не носять системного характеру і загалом зберігають загальні закономірності. Найближчими за значеннями та тенденціями змін виявилися індекси NWI, які майже не відрізняються за даними EO-1 «Hyperion» та «Landsat-7» ETM+. Різниця значень NWI настільки незначна, що її можна пояснити різним часом отримання даних. Взагалі індекс NWI за нашими оцінками показує найбільш стійкі та логічні значення щодо оцінки зволоженості різних видів земного покриву при використанні різних даних супутникової зйомки.

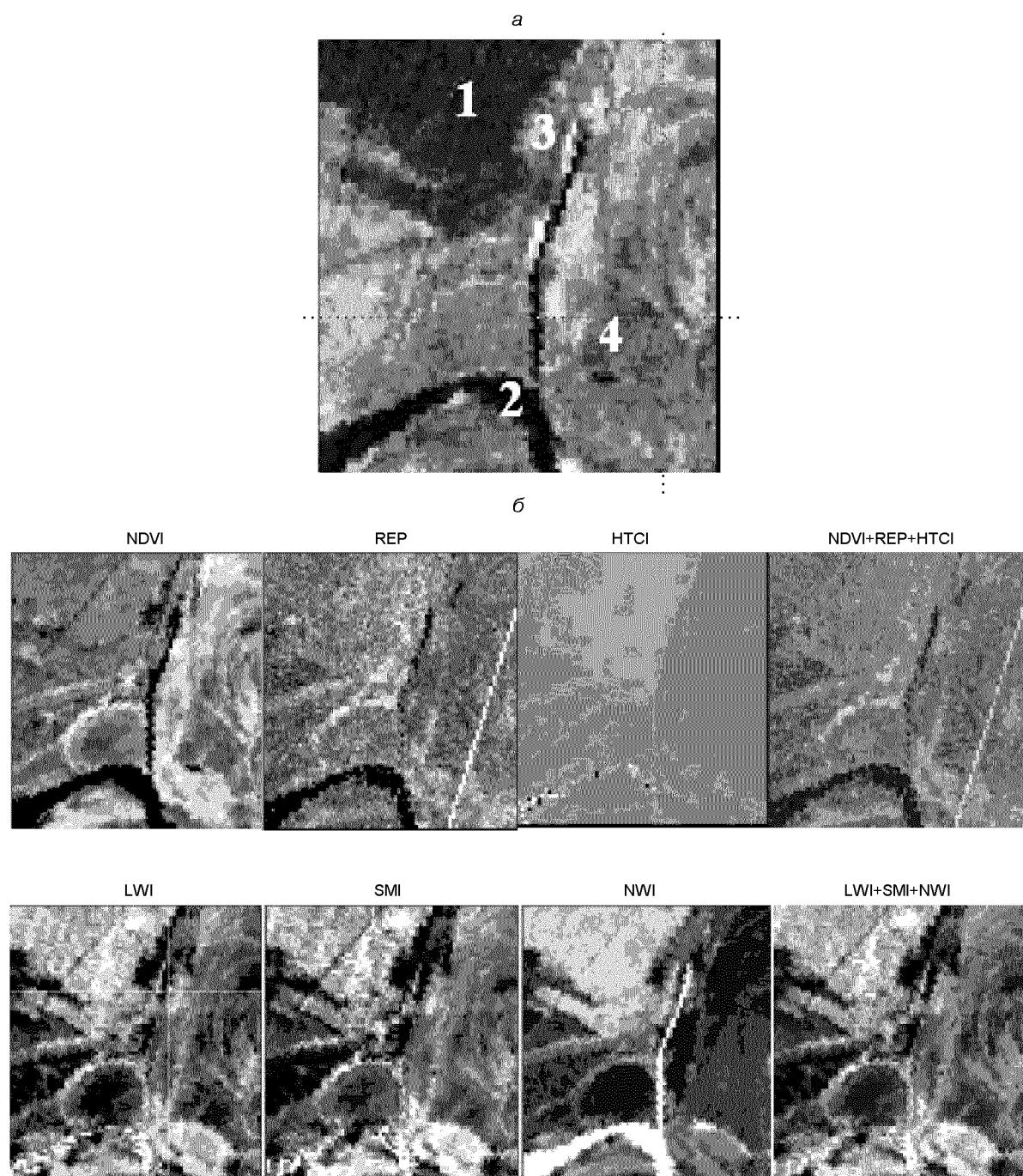


Рис. 2. Збільшене зображення ділянки 1 (див. рис. 1) у синтезованих кольорах (а) та просторові розподіли відповідних індексів (б). Номери на знімку відповідають порядковим номерам типів земного покриву у таблиці: 1 — сосновий ліс, 2 — водна поверхня (р. Десна), 3 — луки, 4 — луки заболочені

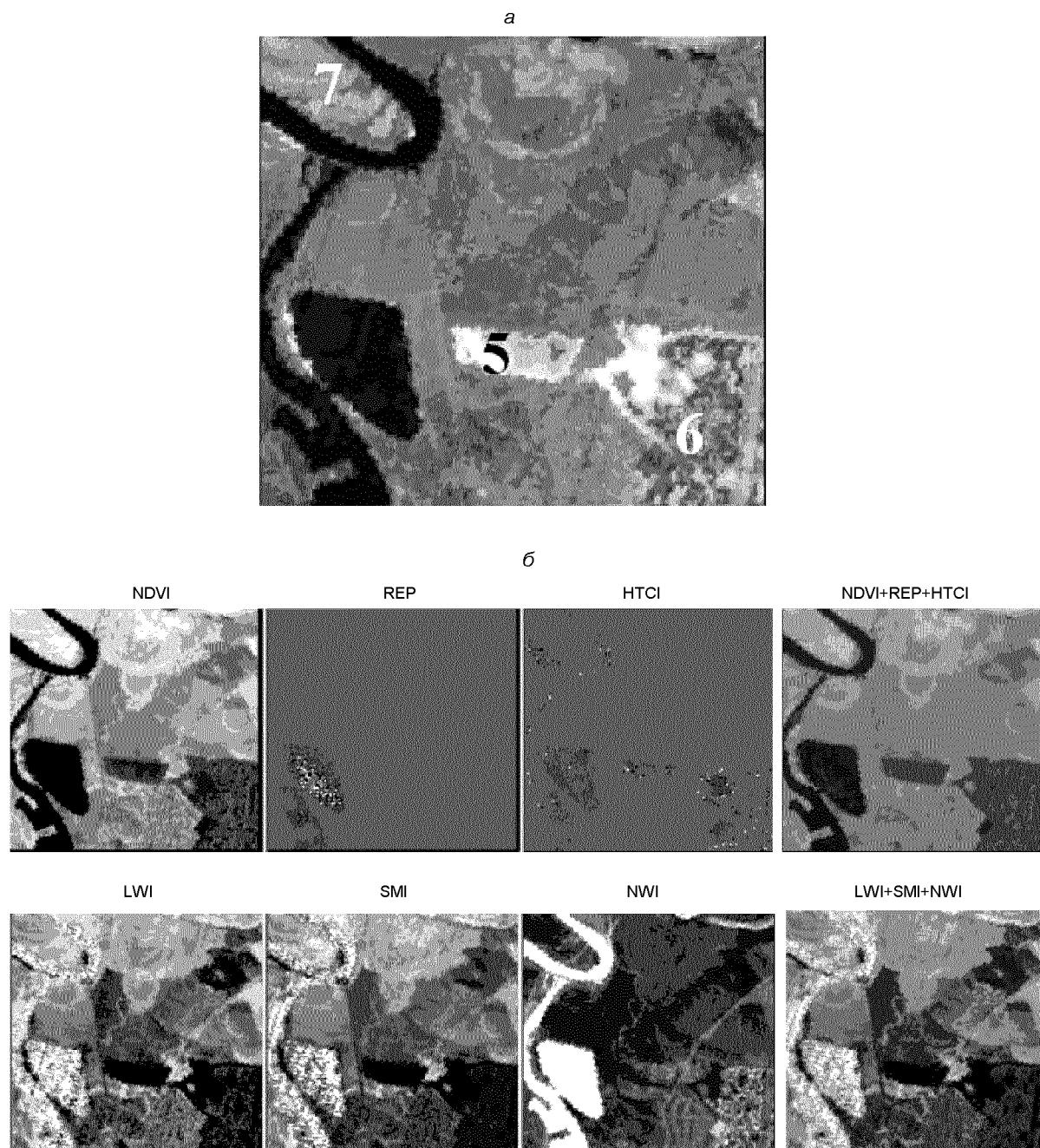


Рис. 3. Те ж для ділянки 2: 5 — відкритий піщаний ґрунт, 6 — міські агломерації (новобудови, Троєщина), 7 — луки та чагарники на піщаних ґрунтах

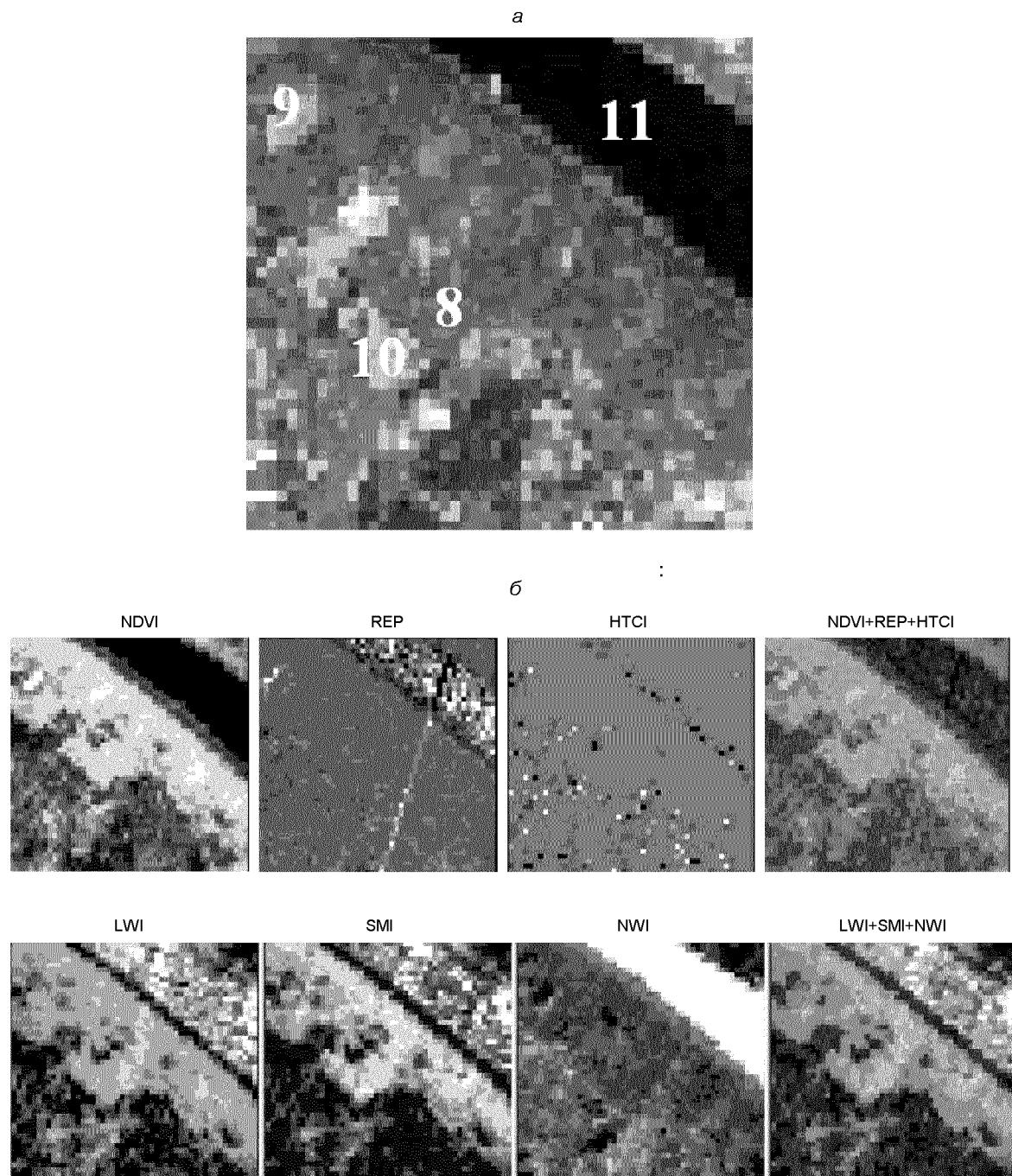


Рис. 4. Те ж для ділянки 3: 8 — листяні деревостани в парковій зоні Києва, 9 — трав'яний покрив (ст. «Динамо»), 10 — міські агломерації (стара забудова в Печерському районі), 11 — водна поверхня (р. Дніпро)

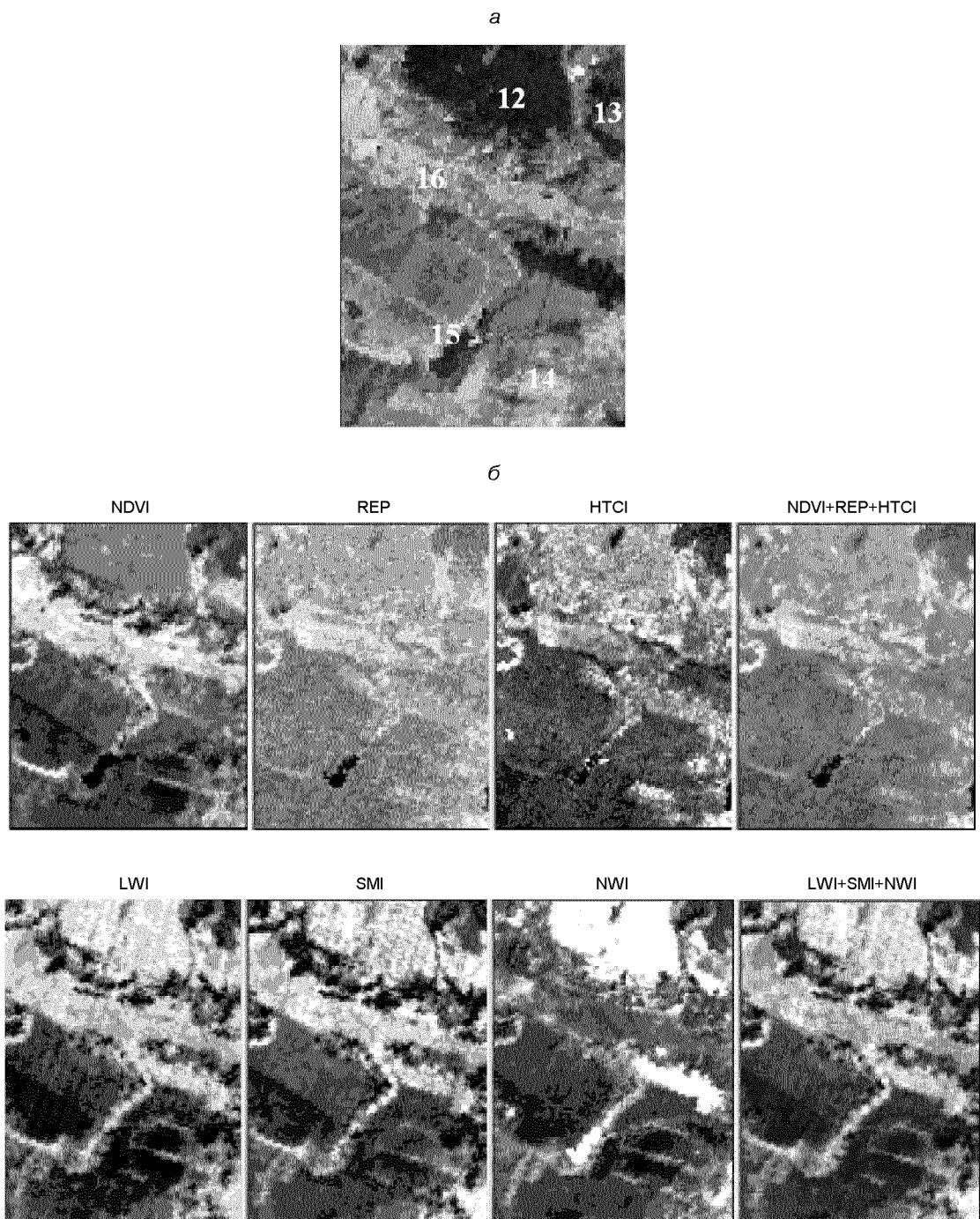


Рис. 5. Те ж для ділянки 4: 12 — сосновий ліс, 13 — листяний ліс, 14 — відкритий ґрунт, 15 — водна поверхня (ставок), 16 — луки заболочені

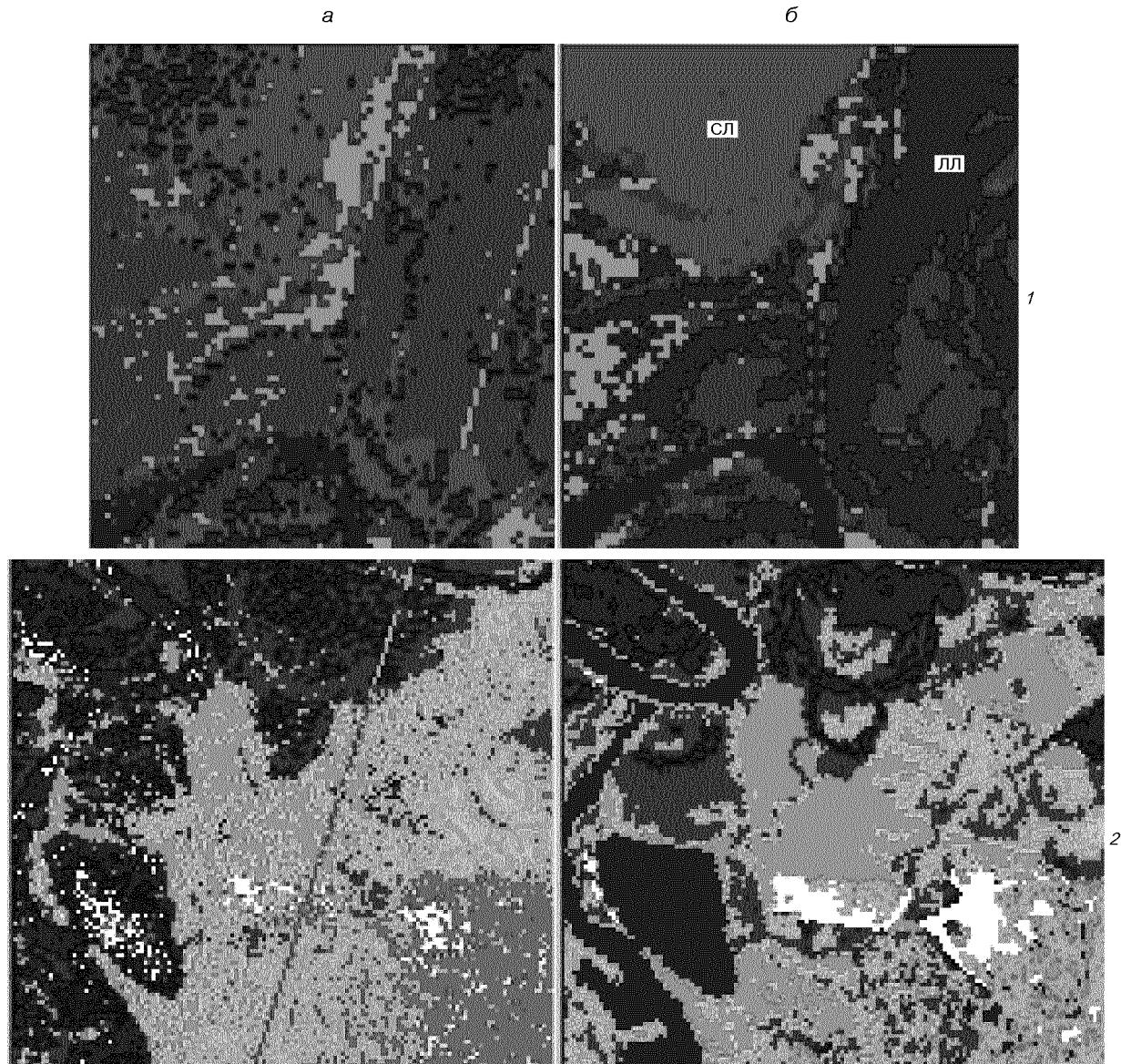


Рис. 6. Результати класифікації земного покриву у межах ділянок I та 2: а — на основі використання індексів, б — на основі використання даних каналів зйомки, з яких вираховуються індекси. Умовні позначення: ліси з перевагою сосни — червоний, кущі та ліси з перевагою листяних порід дерев — темно-зелений, луки та трава у паркових зонах — світло-зелений, луки заболочені — коричневий, водна поверхня — синій, відкритий піщаний ґрунт — білий, міська забудова — фіолетовий, відкритий ґрунт на сільськогосподарських полях — сірий

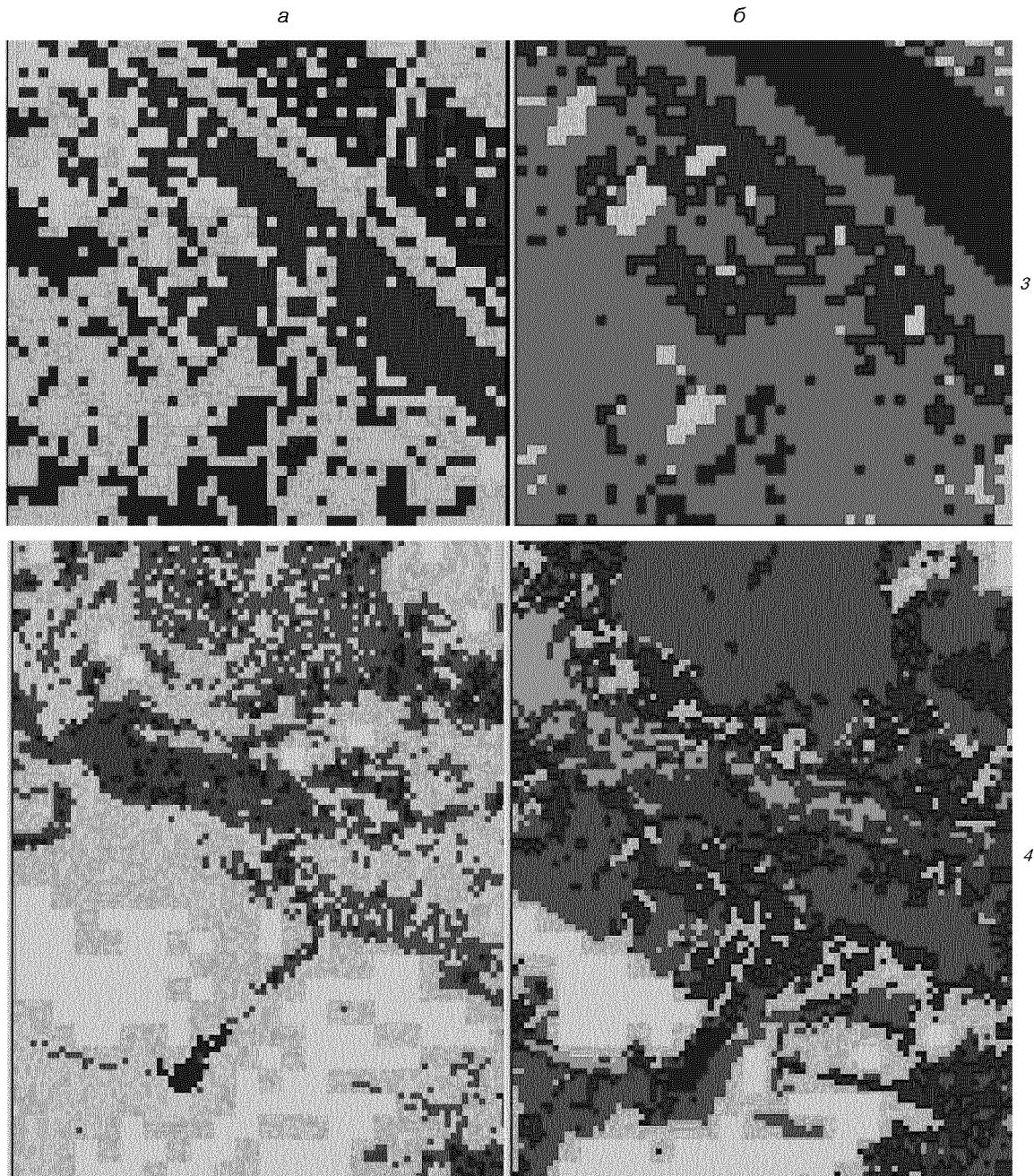


Рис. 6. (закінчення — ділянки 3 і 4)

КЛАСИФІКАЦІЯ НАЗЕМНОГО ПОКРИВУ

Класифікація в межах ділянок на основі використання вегетаційних індексів червоного краю та водних індексів за методом мінімальної відстані показала дещо кращі результати при класифікації рослинного покриву, ніж на основі використання лише спектральних каналів, за якими вони були визначені. Зокрема, на ділянках 1 та 4 коректніше виділяються ліси з перевагою сочни та листяних порід дерев. При цьому грубою помилкою класифікації за початковими даними спектральних каналів на ділянці 4 було виділення соснових лісів в межах окремих сільськогосподарських полів з оранкою. На ділянці 3 точніше класифікується паркова зона при використанні індексів. В той же час водна поверхня та техногенні ландшафти надійніше класифікуються при використанні початкових даних спектральних каналів. Результати класифікації наведено на рис. 6.

Таким чином, використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» може бути рекомендоване для класифікації рослинного покриву, оцінки його зваження та екологічного стану. Для більш надійної класифікації техногенних об'єктів та поверхні водоймищ слід використовувати також і початкові дані каналів гіперспектральної зйомки.

ВИСНОВКИ

Вперше досліджено можливість класифікації наземного покриву ділянок Київської області за даними EO-1 «Hyperion» з використанням зображень вегетаційних індексів червоного краю та водних індексів. При дослідженні рослинного покриву виділених ділянок класифікація методом мінімальної відстані до середнього з використанням сукупності зображень вегетаційних та водних індексів дає кращий результат, ніж з використанням коефіцієнтів відбиття відповідних каналів або окремих індексів. В останньому випадку можливі помилки в класифікації, коли на ділянці 4 замість сільськогосподарських полів з оранкою виділено соснові ліси. Проте водна поверхня та техногенні об'єкти краще класифікуються за комбінацією водних індексів та

значеннями відбиття у відповідних каналах сенсора. Потенціал використання вегетаційних індексів червоного краю не вичерпується лише можливістю точнішої класифікації рослинного покриву, але дозволяє здійснювати оцінку стану окремих видів рослинності та виявляти ділянки із несприятливими умовами зростання.

- Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортьюк З. М. та ін. Аналіз стану лісових масивів зони відчуження ЧАЕС на основі позиції «червоного краю» спектрів відбиття за даними космознімків SPOT-4 та наземних досліджень спектрів відбиття і флуоресценції // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досліджень НАН України.—2005.—№ 1 (14).—С. 105—112.
- Лялько В. І., Шпортьюк З. М., Сахацький О. І., Сибирцева О. М. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільног індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 4.—С. 1—6.
- Лялько В. І., Шпортьюк З. М., Сибирцева О. М. та ін. Дослідження стану лісів з використанням аналога позиції червоного краю за даними SPOT-4 // Тези доп. Міжнар. науково-практ. конф. «Інформаційні технології управління екологічною безпекою, ресурсами та заходами у надзвичайних ситуаціях» (8—11 вересня 2002 р.). — Київ — Харків — Крим, 2002.—С. 47—49.
- Сахацький О. І. Застосування супутникових даних для вирішення задач водообміну у геосистемах // Доповіді НАН України.—2006.—№ 4.—С. 118—126.
- Clevers J., Bartholomeus H., Mucher C., de Wit A. Land cover classification with the Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) // New Strategies for European Remote Sensing / Ed by Oliuic. — Rotterdam: Millpress, 2005.—P. 687—694.
- Collins W., Chang S.-H., Raines G., et al. Airborne Biogeophysical Mapping of Hidden Mineral Deposits // Economic Geol.—1983.—4, N 78.—P. 737—749.
- Danson F. M., Plummer S. E. Red-edge response to forest leaf area index / Int. J. Remote Sensing.—1995.—16.—P. 183—188.
- Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sensing.—2004.—25.—P. 5403—5413.
- Gao B. C. NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment.—1996.—58.—P. 257—266.
- Griffin M. K., Hsu S. M., Burke H. K., et al. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln Laboratory J.—2005.—15.—P. 271—296.
- Hu B., Miller J. R., Zarco-Tejada P., et al. Land Cover Mapping with MERIS at the BOREAS Study Area // MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (MAVT-2003), 20—24 October 2003. — ESRIN., Frascati, Itali, 2003.—10 p.

12. Jago R. A., Curran P. J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra to infer levels of land contamination // RSS'97; Observations and Interactions (Reading: Rem. Sens. Soc.).—1997.—P. 274—279.
13. Lacaze B. Remotely-sensed optical and thermal indicators of land degradation // New Strategies for European Remote Sensing // Ed. by M. Oliuic. — Rotterdam: Millpress, 2005.—P. 211—217.
14. Liu L., Zhang B., Xu G., et al. Vegetation classification and soil moisture calculation using land surface temperature (LST) and vegetation index (VI) // Proc. SPIE.—2002.—4730.—P. 319—323.
15. Lyalko V. I., Fedorovsky A. D., et al. Analysis of plant state at the «red edge» position of reflective signals // Space Research in Ukraine 1998—2000 NSAU. — Kyiv, 2001.—P. 56—57.
16. Pearlman J. S., Barry P. S., Segal C. C., et al. Hyperion, a Space Borne Imaging Spectrometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.—2003.—41, N 6.—P. 1160—1173.
17. Pu R., Gong P., Biging G., et al. Extraction of Red Edge Optical Parameters from Hyperion Data for Estimation of Forest Leaf Area Index // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.—2003.—41, N 4.—P. 916—921.
18. Shportyuk Z. M., Sakhatsky A. I., Sibirtseva O. N. Land cover classification in Ukrainian Carpathians using the MERIS Terrestrial Chlorophyl Index and Red Edge Position from Envisat Meris data // Proc. of Mid-Term Symposium ISPRS «Remote Sensing: From Pixels to Processes», Enschede, the Netherlands, 8—11 May 2006.
19. Xiao X., Boles S., Liu J. Y., et al. Characterization of forest type in Northeastern China, using multitemporal SPOT-4 Vegetation sensor data // Remote Sensing of Environment.—2002.—82.—P. 335—348.
20. Xin J., Tian G., Liu Q., Chen L. Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China // Int. J. Remote Sensing.—2006.—27, N 9.—P. 2071—2076.
21. Zarco-Tejada P. L. J., Rueda C. A., Ustin S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods // Remote Sensing of Environment.—2003.—85.—P. 109—124.

THE USE OF RED EDGE INDICES AND WATER INDICES FROM HYPERSPECTRAL DATA FROM EO-1 HYPERION FOR LAND COVER CLASSIFICATION

V. I. Lyalko, Z. M. Shportyuk, O. I. Sakhatsky, O. M. Sibirtseva

Our earlier results concerning the possibility to use vegetation indices of red edge and water indices from hyperspectral data of EO-1 Hyperion for land cover classification are presented. The experimental evaluation of the use of the indices for land cover classification was carried out within Kyiv region oblast. The classification of vegetation cover using images calculated on the basis of identification of red edge and water indices gives better results than with reflectance. The combination of reflectance and indices images is useful for classification of industrial objects and water bodies. The investigation results show big potential for monitoring of the vegetation cover with the help of the combination of both indices.

УДК 581.133.1.:535.361.2

С. М. Кочубей¹, Т. А. Казанцев¹, В. В. Донец²

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ
ДП Завод «Арсенал», Київ

Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности

Надійшла до редакції 08.10.07

Вивчалась можливість використання деривативного вегетаційного індексу для визначення концентрації хлорофілу за спектрами відбиття систем ґрунт—рослинність з неповним проективним покриттям ґрунту. Вимірювалась спектри відбиття модельних систем, які включають листки рослин з різним вмістом хлорофілу на фоні темного і світлого ґрунту. При зменшенні величини проективного покриття до 25 % відхилення в оцінці хлорофілу практично не перевищували похибку рівняння регресії, яке використовували для розрахунку концентрації. Отримані результати свідчать про дієвість запропонованого підходу в умовах низького рівню покриття ґрунту рослинністю. Дані польових вимірювань спектрів відбиття посівів різною густотою підтверджують отримані лабораторні результати.

ВВЕДЕНИЕ

При дистанционных измерениях спектральных характеристик света, отраженного от растительного покрова, одной из наиболее существенных помех является вклад отражения почвы. Он значительно искажает спектр отражения растительности в случае неполного проективного покрытия почвы растительностью, причем по-разному в зависимости от отражательной способности почвы и спектрального распределения коэффициентов отражения [1, 8]. Это обстоятельство создает трудно преодолимые препятствия при использовании спектральных коэффициентов яркости для определения параметров состояния растительности. Для исключения вклада отражения почвы разработаны специальные вегетационные индексы, рассмотрение которых приведено в работе [3]. Для их расчета необходим ряд дополнительных параметров, в том числе изме-

ряемых в наземных условиях. Процедура таких измерений, а также некоторые другие обстоятельства обусловливают низкую эффективность применения указанных индексов. В последнее время определенный успех достигнут в результате разработки моделей, связывающих механизм пропускания света отдельным листом и фитоценозом [5, 12]. Однако и для этих моделей нужен ряд параметров, которые невозможно определить в непосредственных дистанционных измерениях [10].

Применение аппаратуры и техники гиперспектральных дистанционных измерений открывает новые возможности для исключения указанной выше помехи. Нами разработаны деривативные вегетационные индексы для оценки содержания хлорофилла в листьях, которые, по предварительным данным, выявили низкую чувствительность к уровню проективного покрытия почвы [2, 6]. Показано, что расчет содержания

хлорофилла в листьях некоторых растений, например кукурузы, свеклы и винограда, можно проводить по одному и тому же уравнению регрессии, в то время как для озимой пшеницы нужно использовать другое уравнение [7].

Целью настоящей работы является установление предельной величины отклонения оценки хлорофилла, полученной по нашему методу, с использованием деривативного вегетационного индекса, по спектральным кривым, соответствующим системам почва—растительность с низкими значениями проективного покрытия. Использованы фоны почвы с различной отражательной способностью, а также листья разных растений с разным содержанием хлорофилла. Кроме того, проведены полевые измерения спектров отражения посевов озимой пшеницы с разным значением неполного проективного покрытия почвы.

МЕТОДИКА

В качестве объектов исследования были выбраны листья озимой пшеницы, кукурузы, свеклы, винограда и огурца. Растения выращивали на опытных участках Института физиологии растений и генетики НАН Украины. Листья указанных растений использовали для моделирования спектров отражения системы почва—растительность. Моделирование проводили в двух вариантах. Для физического моделирования измеряли спектры отражения фрагментов листьев определенной площади на фоне почвы, изменяя таким образом различную величину проективного покрытия. Графические модели системы почва—растительность представляли собой линейные комбинации спектральных кривых отражения почвы и листа с весовыми коэффициентами, которые можно было варьировать в диапазоне 0—100 % с шагом 1 %. Модельные спектральные кривые получали с помощью одного из блоков разработанного нами программного обеспечения WINCHL [Kochubey S. M., Yatsenko V. A., Gurinovich N. V., см. сайт <http://vegetation.kiev.ua>].

Спектры отражения измеряли на модифицированном двухлучевом спектрофотометре СФ-10 (ЛОМО), оборудованном интегрирующей сферой. Разработанный нами блок сопряжения с компьютером позволял получать данные в циф-

ровом виде. Спектры отражения измеряли в диапазоне $\lambda\lambda = 400—750$ нм с шагом 1 нм.

Спектральные кривые отражения сглаживали и рассчитывали первые производные по формулам Савицкого — Голая [9]. Для сглаживания применяли полиномы второй степени и скользящего окна размером 5 точек. Первые производные рассчитывали с использованием полиномов третьей степени и скользящего окна размером 11 точек.

Спектры отражения посевов озимой пшеницы измеряли с помощью разработанного нами полевого спектрометра [11, см. также сайт <http://vegetation.kiev.ua>]. Прибор устанавливали на штативе над посевом на высоте 115 см от верхушек растений. При этом размер исследуемого участка посева составлял 35×35 см. Измерения спектров отражения проводили с 3-кратной повторностью. Из этого участка посева отбирали девять растений из точек, отстоящих друг от друга на одинаковом расстоянии, для определения концентрации хлорофилла. Участок посева фотографировали, и по полученному изображению определяли величину проективного покрытия путем выборочного удаления цвета в программе Adobe Photoshop 7.0 Professional.

Концентрацию хлорофилла в пересчете на единицу площади листа определяли для каждого яруса листьев. Листья, собранные с каждого яруса всех девяти растений, сканировали с помощью сканера Mustek Scan Express 12000Р и затем определяли их площади путем компьютерной обработки полученных изображений. После этого из этих листьев экстрагировали хлорофилл в 80 % ацетоне, спектрофотометрировали и рассчитывали содержание хлорофилла по формуле Арнона [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализировали форму спектров отражения модельных систем почва—растительность, которые имитировали проективное покрытие почвы, равное 100, 50 и 25 %. Они представляли собой фрагмент листа, помещенный поверх слоя почвы. В первом случае площадь исследуемой поверхности листьев совпадала с размером поля зрения прибора. В двух других — размеры фрагментов листа закрывали 50 или 25 % пло-

щади поля зрения на фоне темной или светлой почвы.

Спектры отражения систем с неполным проективным покрытием отличаются от таковых для варианта с полным покрытием (рис. 1). В случае светлой почвы увеличивается значение коэффициента отражения по всему спектральному диапазону. Зеленый максимум и красный минимум спектра становятся менее выраженными, изме-

няется наклон спектральной кривой в области красного края ($\lambda = 680—750$ нм). В случае темной почвы уменьшение проективного покрытия вызывает снижение коэффициента отражения по всему спектру, а также изменение деталей спектра.

Рассмотрение графиков первой производной спектральных кривых коэффициента отражения (рис. 2) показывает, что в случае неполного

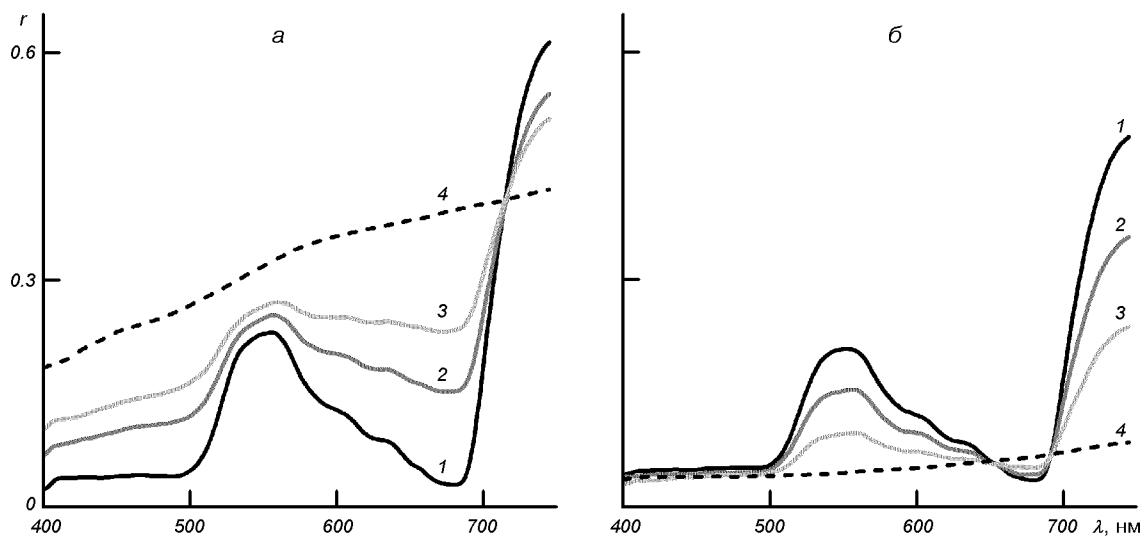


Рис. 1. Спектры отражения r системы почва — растительность, имитированные с использованием листьев огурца на фоне светлой (а) и темной (б) почвы: 1, 2, и 3 — для проективного покрытия 100, 50 и 25 %, 4 — спектр отражения почвы

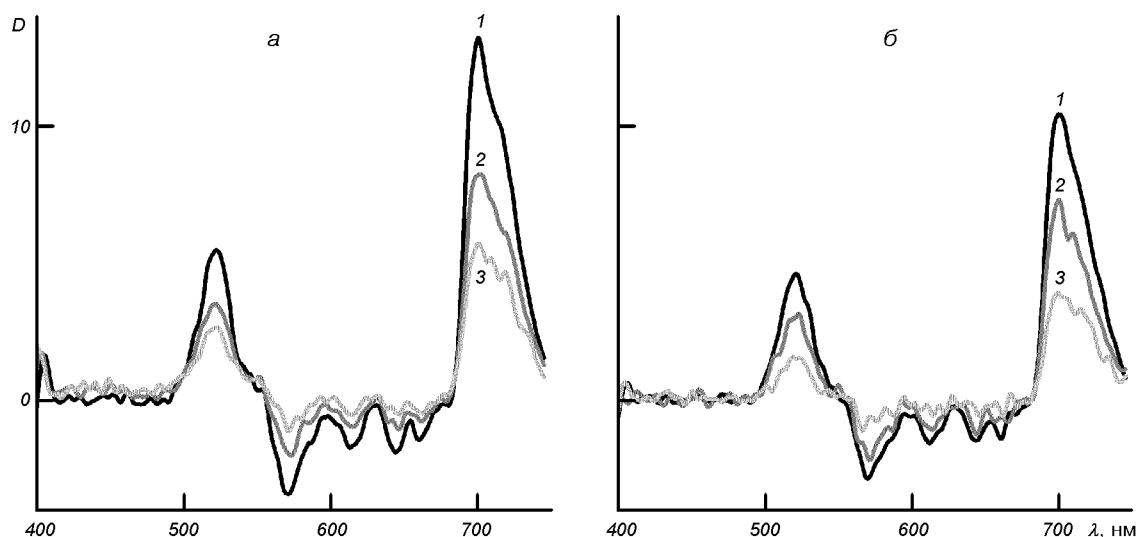


Рис. 2. Графики первых производных $D = dr/d\lambda$ от спектральных кривых отражения системы почва — растительность, приведенных на рис. 1

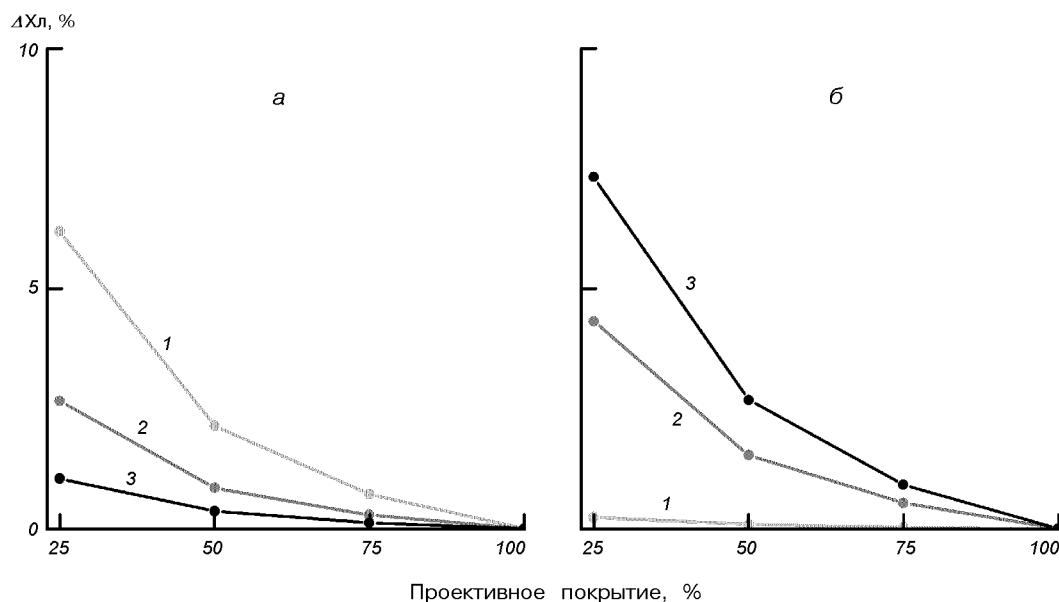


Рис. 3. Значения отклонений оценки хлорофилла в зависимости от величины проективного покрытия для светлой (а) и темной (б) почвы: 1, 2 и 3 — низкое ($1.5 \text{ мг}/\text{дм}^2$), среднее ($3.0 \text{ мг}/\text{дм}^2$) и высокое ($3.8 \text{ мг}/\text{дм}^2$) содержание хлорофилла в листьях

проективного покрытия указанные изменения влияют только на амплитуду производной, но не на ее форму. Из этого следует, что разработанный нами деривативный вегетационный индекс D_{725}/D_{702} [7], где D_λ — значение первой производной при $\lambda = 725$ и 702 нм, должен сохранять свою работоспособность для оценки содержания хлорофилла в системах с неполным проективным покрытием. Для проверки этого заключения были рассчитаны концентрации хлорофилла по спектрам отражения моделей с полным и неполным проективным покрытием с применением указанного выше деривативного индекса.

Различие оценок хлорофилла для вариантов с неполным проективным покрытием увеличивается при уменьшении площади листа на фоне почвы. Характер изменений величины отклонения зависит от концентрации хлорофилла в листе и отражательной характеристики почвы. Для изучения зависимости отклонений концентрации хлорофилла от величины проективного покрытия в более широком диапазоне значений этих показателей были использованы графические модели (см. выше). Расчеты содержания хлорофилла по модельным и экспериментально

полученным спектральным кривым, соответствующим 50 и 25 % покрытию, дали хорошее совпадение, что дает основание к применению графического моделирования.

Указанные зависимости приведены на рис. 3 на примере листьев огурца с разной концентрацией хлорофилла на фоне темной и светлой почвы. Видно, что в случае светлой почвы максимальные отклонения наблюдаются для листьев с низким содержанием хлорофилла, в то время как темная почва сильнее влияет на оценку хлорофилла для листьев с высоким содержанием пигмента. Однако даже при уровне проективного покрытия 25 % отклонения оценки хлорофилла от варианта покрытия 100 % лишь незначительно превышают величину ошибки уравнения регрессии, использованного для расчета концентрации хлорофилла по деривативному индексу (табл. 1, 2).

Максимальные отклонения оценки хлорофилла в моделях с проективным покрытием 25 % были определены для нескольких видов растений, для которых, как было показано ранее, оказалось возможным использовать приведенный выше деривативный индекс [7]. Были ис-

Таблица 1. Различия оценок концентрации хлорофилла для вариантов покрытия 25 % и 100 % (ХЛ₂₅ и ХЛ₁₀₀) в системе с низкой концентрацией хлорофилла и светлой почвой

Вид растения	ХЛ ₁₀₀ , мг/дм ²	ХЛ ₂₅ /ХЛ ₁₀₀ , %	Ошибка регрессии, %
Пшеница	2.7±1.2	111	44
Кукуруза	1.0±0.3	132	35
Виноград	1.0±0.3	122	29
Огурец	1.8±0.2	106	11

Таблица 2. Различия оценок концентрации хлорофилла для вариантов покрытия 25 % и 100 % (ХЛ₂₅ и ХЛ₁₀₀) в системе с высокой концентрацией хлорофилла и темной почвой

Вид растения	ХЛ ₁₀₀ , мг/дм ²	ХЛ ₂₅ /ХЛ ₁₀₀ , %	Ошибка регрессии, %
Пшеница	7.6±1.2	89	16
Кукуруза	4.6±0.3	88	8
Виноград	3.9±0.3	91	7
Огурец	3.5±0.2	93	6

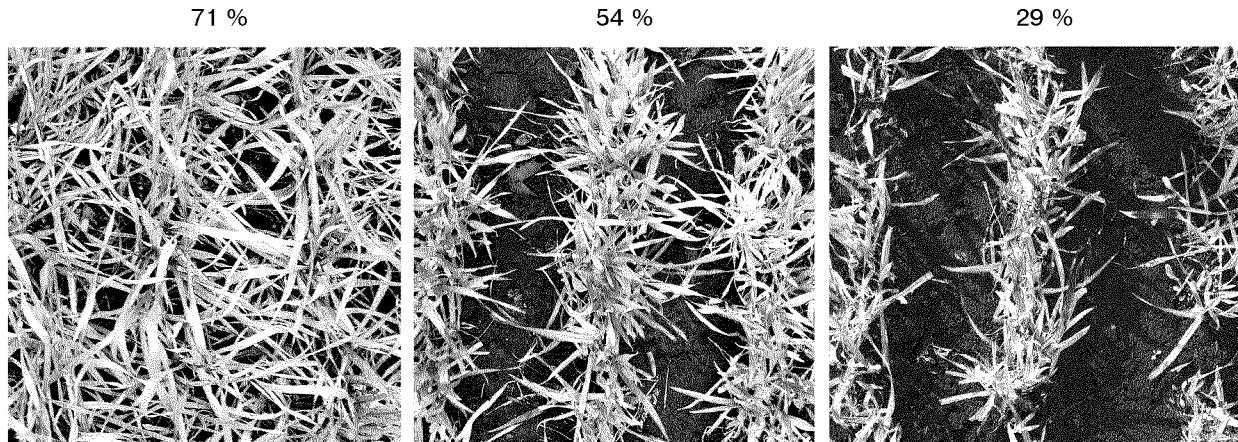


Рис. 4. Изображения участков посевов озимой пшеницы с разным проективным покрытием, использованных для спектрометрирования в натуральных условиях

пользованы листья с низким и предельно высоким для каждого вида содержанием хлорофилла на фоне темной и светлой почвы. Для всех растений отклонения не превышали ошибку регрессии в вариантах со светлой почвой и низким содержанием хлорофилла, и в некоторых случаях незначительно превышали ее в вариантах с темной почвой и высокой концентрацией хлорофилла (табл. 1, 2).

Таким образом, разработанный нами деривативный индекс позволяет с достаточной точностью получать оценки хлорофилла для самых неблагоприятных систем почва—растительность и для проективного покрытия вплоть до 25 %. Известно, что в этих случаях методы, основанные на использовании коэффициентов яркости, теряют работоспособность [1].

Оценено содержание хлорофилла по спектральным кривым отражения посевов озимой пшеницы. Измерения проведены с помощью разработанного нами полевого спектрометра. Посевы спектрометрировались в разных фазах вегетации, благодаря чему величина проективного покрытия варьировала в диапазоне 29—71 %. Фотографии участков с разным проективным покрытием показаны на рис. 4. Как указывалось выше, химическим способом измеряли концентрацию хлорофилла в листьях разных ярусов. Исследовали корреляцию между концентрацией хлорофилла и индексом D_{725}/D_{702} , рассчитанным по спектрам посевов. Оказалось, что наивысшая корреляция ($R = 0.94$) обнаруживается для верхних ярусов листьев растений в посевах (рис. 5).

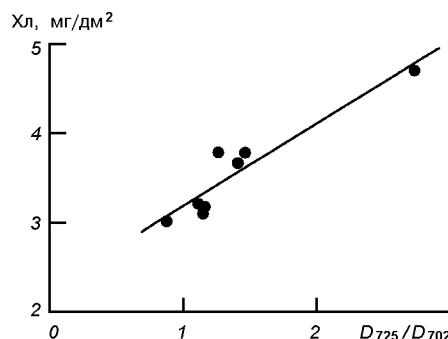


Рис. 5. Зависимость между средней концентрацией хлорофилла (Хл) в верхних листах посевов озимой пшеницы и значением деривативного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектральным кривым отражения этих посевов

Таким образом, испытания метода, проведенные в натуральных условиях, подтвердили вывод о том, что метод оценки хлорофилла с использованием деривативных индексов действительно работоспособен при низких значениях проективного покрытия почвы растительностью. Аппаратура, построенная на основе этого метода, может применяться в быстрых полевых обследованиях для тестирования содержания хлорофилла в растениях.

- Кочубей С. М. Сравнение информационных возможностей многозональной съемки и спектроскопии высокой разрешающей способности при дистанционном зондировании растительного покрова // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 2/3.—С. 41—48.
- Кочубей С. М. Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом диапазоне // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 185—190.
- Шадчин Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ: Укр. фітосоц. центр, 2001.—319 с.
- Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris // Plant Physiol.—1949.—24.—P. 1—15.

- Jacquemoud S., Bacour C., Polive H., Frangi J.-P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode // Remote Sens. Environ.—2000.—74.—P. 471—481.
- Kochubey S. M., Biduk P. I. A Novel Approach to remote sensing of vegetation // Proc. SPIE.—2003.—5093.—P. 181—188.
- Kochubey S., Kazantsev T. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content // J. Plant Physiol.—2007.—164, N 12.—P. 1648—1655.
- Kochubey S. M., Yatsenko V. A. Monitoring system for agricultural crops on chlorophyll basis // Proc. SPIE.—2000.—5232.—P. 92—99.
- Savitzky A., Golay M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Analys. Chem.—1964.—36, N 8.—P. 1627—1639.
- Sims D. A., Gamon J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sens. Environ.—2002.—81.—P. 337—354.
- Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T. Hardware software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Proc. SPIE.—2005.—5964.—P. 267—270.
- Zarco-Tejada P. J., Miller J. R., Harron J., et al. Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies // Remote Sens. Environ.—2004.—89, N 2.—P. 189—199.

THE USE OF DERIVATIVE VEGETATION INDICES FOR THE ELIMINATION OF INTERFERENCES CAUSED BY SOIL REFLECTION IN REMOTE SENSING OF VEGETATIVE COVER

S. M. Kochubey, T. A. Kazantsev, V. V. Donets

Effectiveness of derivative vegetation index for chlorophyll estimation in oil-vegetation systems with incomplete soil covering was tested. We measured reflectance spectra for the model systems consisting of plant leaves with various chlorophyll content and soil with various brightness. Distinctions between chlorophyll values estimated for 25 % and 100 % soil covering did not significantly exceed the error of regression formula used for the chlorophyll estimation. Our results prove the capability of the proposed approach for testing crops with a low level of soil covering. The field reflectance measurements of crops with various growing density confirm the laboratory results.

УДК 612.018.2:57.017.35:611.018.4

В. Я. Березовський, І. Г. Літовка,
О. С. Костюченко, Р. В. Янко

Вплив мелатоніну на процеси фізіологічної регенерації кісткової тканини молодих та дорослих щурів

Надійшла до редакції 12.02.08

Досліджувався вплив 28-денноого перорального введення екзогенного мелатоніну у дозі 1 мг/кг на процеси фізіологічного ремоделювання кісткової тканини 3- та 9-місячних щурів-самців лінії Вістар. Виявлено, що вихідна концентрація мелатоніну у 9-місячних щурів вища, ніж у щурів віком 3 місяці. Показано достовірне збільшення концентрації мелатоніну у сироватці крові молодих та дорослих дослідних щурів на 50 та 25.6 % відповідно, достовірне збільшення активності лужної фосфатази у кістковій тканині обох дослідкуваних груп тварин та її зменшення у сироватці крові 9-місячних щурів і тенденцію до зниження у 3 місяці. Підвищення ендогенного рівня гормону супроводжувалося достовірним збільшенням активності кислої фосфатази у 1.6 і 1.3 рази та концентрації гліказаміногліканів у сироватці крові у 3.1 і 1.4 рази для 3- та 9-місячних щурів відповідно. Експресія гена інсульноподібного фактора росту-І у тварин обох дослідкуваних груп мала тенденцію до підвищення. Зроблено висновок, що введення мелатоніну у дозі 1мг/кг значно інтенсифікує фізіологічне ремоделювання як у молодих, так і дорослих щурів.

ВСТУП

У космічному польоті на організм людини впливає комплекс факторів: невагомість, космічне випромінювання, нервово-емоційне напруження. Крім того, існує не менш важлива проблема порушення синхронності фізіологічних функцій — десинхроноз. У нових умовах організм деякий час продовжує функціонувати по-старому, а потім поступово починає звикати до нового розкладу дня. Ашофром вперше показана динаміка взаємодії фізіологічних ритмів у добовому циклі ссавців [2].

Припускають, що послабити десинхроноз можна за допомогою сучасних наукових методів, наприклад шляхом ритмічного впливу світловими, звуковими, тепловими сигналами за спеціально підібраною програмою їхньої зміни [7].

Процес фізіологічної регенерації кісткової тканини у ссавців відбувається безперервно протягом усього життя. Він контролюється центральними нейрогенними, системними гормонами, серед яких найбільш дослідженими є паратиреоїдний гормон, кальцитонін та гормон росту, а також локальними гуморальними факторами росту — природними поліпептидами, близькими до гормонів, що діють на кісткову тканину через аутокринні, паракринні та ендокринні механізми [11, 12, 15]. В останні роки виявлено велика кількість ростових факторів та гормонів, які здійснюють різнонапрямлені впливи на масу, процеси ремоделювання кісткової тканини тощо. Серед них мелатонін — основний гормон епіфізу. Показано, що мелатонін, який здійснює контроль над темпами старіння, ростом пухлин та репродуктивними функціями, регулює кров'яний тиск, також активно впливає на кісткову

тканину [11, 17]. Мелатонін, отриманий синтетичним шляхом, рекомендовано як адаптогенний засіб при підвищених навантаженнях на організм, а також при інших станах. Остаточно спектр терапевтичної дії мелатоніну не визначений.

Біоритмологічна структура гомеостазу кісткової тканини досить пластична і легко модифікується змінами умов зовнішнього середовища: рівня рухової активності, ритму світло/темрява, режиму харчування [16]. Показано, що порушення фотоперіодів може призводити до інтенсифікації або гальмування ремоделювання кістки [17]. Є точка зору, що і мелатонін регулює циркадні ритми метаболізму кістки. Він діє опосередковано, шляхом зміни концентрацій ендогенних факторів — паратиреоїдного та тиреоїдного гормону, інсуліноподібного фактора росту-1. Крім того, мелатонін виконує функції модулятора диференціації остеобластів та остеокластів [18], сприяє мінералізації матриксу у культурі, посилює синтез колагенових та неколагенових білків кісткового матриксу, гальмує розвиток остеопенії, активуючи секрецію гормону росту у щурів [20]. Сучасними дослідженнями показано, що ритми синтезу мелатоніну в організмі людей і тварин також обмежуються періодичністю світла і темряви, а з віком рівень його експресії в організмі знижується.

Таким чином, постає питання про можливість регуляції інтенсивності процесів фізіологічної регенерації кісткової тканини у тварин різного віку шляхом змінювання добового рівня мелатоніну в крові.

Мета роботи — дослідити можливість застосування екзогенного мелатоніну для модулювання процесів фізіологічної регенерації кісткової тканини у щурів віком 3 та 9 місяців.

МЕТОДИКА

Досліди тривалістю 28 діб виконано у весняний період на 34 щурах-самцях лінії Вістар віком 3 та 9 місяців. Тварин розподілили по групах таким чином: I, II — контрольні та дослідні 3-місячні щури, III і IV — контрольні та дослідні 9-місячні щури. Протягом експерименту всі тварини перебували в уніфікованих умовах зі стандартним раціоном харчування та природним

циклом світло/темрява (тривалість освітлення: від 6 год 30 хв до 17 год 30 хв) і мали вільний доступ до води.

Тваринам досліджуваної груп перорально у дозі 1 мг/кг маси тіла вводили 1 мл водної суспензії мелатоніну (Unipharm Inc., США) о 17 год, тобто у той час, коли його фізіологічна концентрація була мінімальною. Одночасно контрольним щурам вводили еквівалентну кількість дистильованої води.

У всіх групах щурів щотижня натшесерце реєстрували масу тіла кожної особини. Загальний стан тварин та інтенсивність метаболізму кісткової тканини контролювали за допомогою фізіологічних та біохімічних методів дослідження. Досліди проводилися з виконанням міжнародних вимог про гуманне ставлення до тварин.

Матеріалом для досліджень були свіжовидалені стегнові кістки щурів, печінка та сироватка крові, які одержували від декапітованих під рауш-наркозом тварин. Біохімічні показники фізіологічної регенерації кісткової тканини визначали за допомогою спектрофотометричних, імуноферментних методів та полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР). У сироватці крові та кістковій тканині визначали показники формування КТ: концентрацію мелатоніну з допомогою стандартних наборів реактивів (фірма «Buhmann», Швейцарія), активність лужної фосфатази (КФ 3.1.3.1, фірма «Лахема», Чехія) та її кістковий ізофермент, показники резорбції кісткової тканини — загальну каталітичну активність кислої фосфатази (КФ, КФ 3.1.3.2) та тартратрезистентну кислу фосфатазу (фірма «Лахема», Чехія), концентрацію гліказаміногліканів за методом Кляцкіна [6].

Для дослідження змін біофізичних властивостей кісткової тканини визначалась маса кісток шляхом зважування на торсійних терезах типу ВТ з межею визначення 500 мг та точністю до 1 мг цілих стегнових кісток у дистильованій воді та на повітрі. Об'єм зразків розраховувався за формулою $V = (M_{\text{на пов.}} - M_{\text{у воді}})/d$, де d — густина води, що дорівнює 0.996 при 20 °C, M — маса зразка. Розраховувалась щільність кісток за формулою $P = M/V$. Вимірювалась загальна довжина стегнової кістки (відстань від голівки кістки до площини, що проходить через найнижчі точки латерального та медіального ми-

щелків) та сагітальний діаметр середини діафізу стегнової кістки [1].

Рівень експресії гена інсуліноподібного фактора росту-1 (ІПФР-І) визначали у гомогенаті печінки. Для цього 20 мг печінки гомогенізувались у 375 мл розчину «Рибозоль-А».

По закінченні процедури проби зберігали при -70°C до проведення полімеразної ланцюгової реакції.

За маркерний ген (внутрішнього контролю рівня експресії мРНК) приймали ген GAPDH (glyceraldehydephosphate dehydrogenase). Для виділення РНК та видалення слідів геномної ДНК у зразках використовувались набори «Рибозоль» («AmpliSens», Москва, Росія) та 1 U RNase-free DNase (Sigma, USA) відповідно. Реакція оберненої транскрипції проводилася з використанням стандартних наборів «Реверта-L-100» («AmpliSens», Москва, Росія). Кількість специфічної РНК подавалась як добуток площини смуги на інтенсивність її світіння за допомогою програми «BioTestColor». Рівень експресії гена в умовних одиницях розраховувався як відношення кількості специфічної РНК до кількості маркерної GAPDH-РНК у тому ж зразку.

Цифрові дані оброблялись з використанням пакету програмного забезпечення Magellan 3.0, програми Microsoft Excell 2003. Для визначення достовірності відмінностей між двома вибірками використовували *t*-критерій Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

У наших дослідженнях виявлено збільшення маси тіла молодих тварин контрольної (І) та експериментальної (ІІ) груп протягом 28 діб експерименту. Відносний приріст маси тіла тварин І групи за 1-й тиждень становив 10.7 %, на кінець 2-го і 3-го тижнів — 36.3 % та 52.3 % відповідно, і в кінці експерименту склав 73.8 %. У тварин ІІ групи, яким вводили мелатонін, цей показник за 1-й тиждень дорівнював 28.72 %, на кінець 2-го і 3-го тижня — 35.6 % та 71.3 % відповідно. Відносний приріст маси тіла у тварин цієї групи на кінець експерименту становив 95.5 % і був значно вищим від значень контрольної групи (рис. 1).

Маса стегнових кісток щурів ІІ групи після закінчення експерименту була лише на 2.5 %

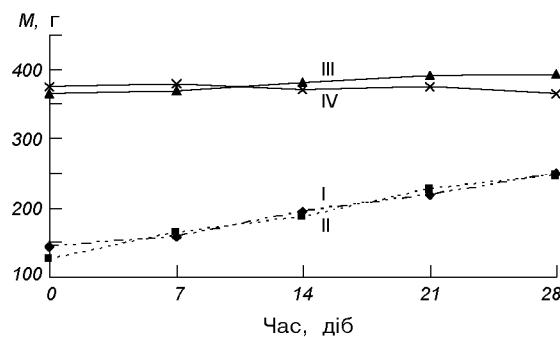


Рис. 1. Значення маси M тіла щурів під час експерименту: І, ІІ — контрольні та дослідні 3-місячні щури; ІІІ, ІV — контрольні та дослідні 9-місячні щури

нижчою порівняно з контрольними значеннями. Співвідношення маси стегнової кістки до маси тіла як у контрольних щурах, так і у тварин, яким вводили мелатонін у кінці експерименту, було однаковим і становило 0.002. У дослідженнях ми не спостерігали змін щільності стегнових кісток у тварин ІІ групи порівняно з контролем. Об'єм мав тенденцію до зниження. Загальна довжина та сагітальний діаметр стегнових кісток у досліджуваних тварин не відрізнялися від контрольних значень і дорівнювали 32.7 ± 0.37 та 3.19 ± 0.09 мм відповідно.

У 9-місячних тварин контрольної групи збільшення маси тіла було повільнішим порівняно з 3-місячними щурами. Відносний приріст маси тіла тварин ІІ групи за 1-й тиждень становив 0.95 %, за 2-й і 3-й тиждень — 4.04 та 7.1 % відповідно, і в кінці експерименту склав 7.45 %. У тварин ІІІ групи маса тіла змінювалася нерівномірно протягом 28 діб. Відносний приріст маси за 1-й тиждень дорівнював 0.92 %. За 2-й тиждень у тварин цієї групи спостерігалося незначне зниження маси тіла на 1.72 %. За 3-й тиждень відносний приріст маси тіла склав 0.21 %. У кінці експерименту маса тіла цих тварин знизилася на 2.5 % порівняно з вихідними даними для даної групи.

У щурів ІІІ групи, яким вводили мелатонін, маса стегнових кісток після завершення експерименту мала тенденцію до підвищення порівняно з контролем. Відношення маси стегнової кістки до маси тіла у дорослих щурів контрольної та експериментальної груп було однаковим і

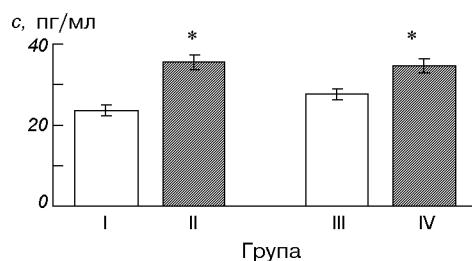


Рис. 2. Значення концентрації *c* мелатоніну у сироватці крові контрольних (I, III) та дослідних (II, IV) щурів. Зірочкою тут та на інших рисунках відмічено значення, що суттєво відрізняються від контрольних (довірча ймовірність понад 95 %)

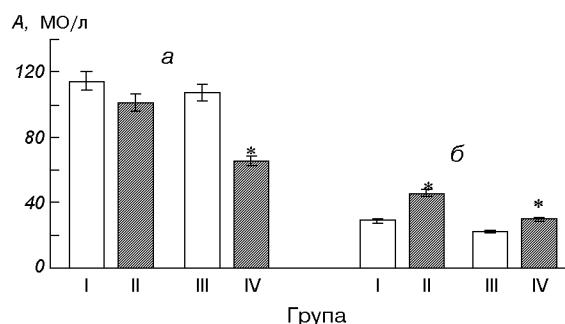


Рис. 3. Показник *A* активності лужної (*a*) та кислої (*b*) фосфатази у сироватці крові контрольних (I, III) та дослідних (II, IV) щурів

становило 0.002 у кінці експерименту. Щільність та об'єм стегнової кістки у тварин IV групи не мали суттєвих змін порівняно з контрольними даними. У дорослих щурів експериментальної групи ми також не виявили змін довжини та сагітального діаметра стегнових кісток.

Відомо, що ріст кісток відбувається нерівномірно протягом онтогенезу. У молодих тварин закономірно відбувається активна мінералізація кісткової тканини, комбінування росту кісток у довжину і ширину, характерне для даного періоду остеогенезу, формування кісткової маси [3, 8]. Тенденція до зменшення об'єму стегнової кістки може бути наслідком незначного зниження активності остеогенних клітин перисту та активації остеокластів на поверхні кістки під впливом гормонального модулювання метаболізму. У той же час у дорослих тварин відбувається лише заміна застарілих елементів, а темпи формування й руйнування кісткової тканини зазвичай врівноважені [9].

У контрольній групі I молодих щурів фізіологічна концентрація мелатоніну у крові становила 23.67 пг/мл. Введення екзогенного мелатоніну у дозі 1 мг/кг о 17 год щурам II групи призвело до достовірного збільшення його загальної концентрації у сироватці крові до 36.5 пг/мл, що на 50 % вище, ніж у молодих інтактних тварин (рис. 2). У 9-місячних щурів, за нашими даними, концентрація мелатоніну у сироватці крові контрольної групи III була дещо вищою, ніж у 3-місячних тварин, і становила 27.58 пг/мл. Після введення мелатоніну дорослим щурям IV групи його концентрація достовірно підвищилася до 34.65 пг/мл, що на

25.6 % вище, ніж у контролі. Протягом доби рівень мелатоніну у щурів за даними багатьох досліджень досягає свого максимуму о 2 год з наступним поступовим зниженням. Його мінімальну концентрацію відмічено о 17 год [16].

Зважаючи на добові флуктуації рівня мелатоніну у сироватці щурів, у експерименті після введення мелатоніну о 17 год нам вдалося досягти значення його концентрації, яке відповідало 6 год 30 хв доби.

Активність остеобластів (клітин, які формують нову тканину) та остеокластів (клітин, що відповідають за її резорбцію) оцінювали за активністю характерних для цих клітин біохімічних показників у сироватці крові та кістковій тканині.

Показано, що пероральне введення мелатоніну о 17 год викликало тенденцію до зниження активності лужної фосфатази у сироватці крові досліджуваних щурів II групи (рис. 3).

Ці дані збігаються з результатами інших досліджень [16, 17], в яких показано обернено пропорційну залежність між інтенсивністю добової секреції мелатоніну та активністю лужної фосфатази сироватки крові у молодих щурів за фізіологічних умов. Високі рівні мелатоніну, характерні для нічного періоду, супроводжувалися тенденцією до зниження активності цього фермента у сироватці крові. Однак у щурів II групи спостерігалося достовірне зростання активності лужної фосфатази у кістковій тканині в 1.5 раза порівняно з контрольними даними (рис. 4, a). Таким чином, при збільшенні концентрації мелатоніну у крові відзначено обернено пропорційну залежність між активністю луж-

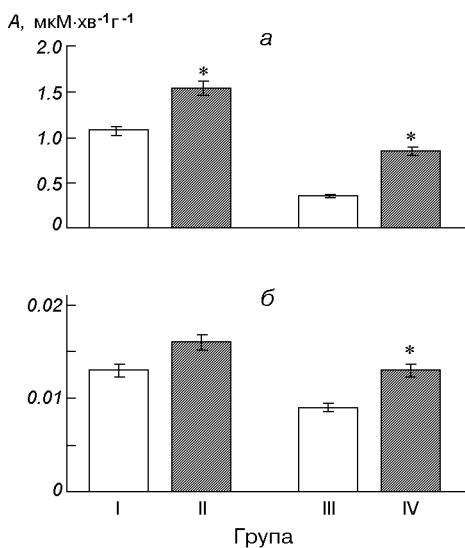


Рис. 4. Показник A активності лужної (а) та кислої (б) фосфатази у кістковій тканині контрольних (I, III) та дослідних (II, IV) щурів

ної фосфатази у сироватці крові та пряму залежність у кістковій тканині.

Відомо, що мелатонін стимулює диференціацію остеобластів з клітин остеобластної лінії у культурі [18]. Підвищення активності лужної фосфатази у кістковій тканині за нашими даними, ймовірно, може бути наслідком появи великої кількості зрілих остеобластів та активації експресії гена цього ферменту, викликане зростанням загального рівня мелатоніну в організмі.

У молодих щурів після введення мелатоніну активність кислої фосфатази у сироватці крові підвищилася у 1.6 раза відносно вихідних даних (рис. 3). У кістковій тканині активність цього ферменту мала тенденцію до збільшення (рис. 4, б). Активність тартратрезистентної кислої фосфатази у сироватці крові дослідних щурів залишалася стабільною. Отримані результати узгоджуються з даними про ключову роль остеобластів у дозріванні остеокластів та активації резорбції кісткової тканини [10, 19].

Співвідношення ЛФ/КФ (лужна фосфатаза/-кисла фосфатаза) та ЛФ/ТРКФ (лужна фосфатаза/тартратрезистентна кисла фосфатаза) у сироватці крові контрольних молодих щурів дорівнювало 3.96 та 7.23 відповідно. Варто зауважити, що у досліджуваних тварин співвідношення ЛФ/КФ у сироватці крові майже не змінювалося порівняно з контролем і дорівнювало 4, тоді як співвідношення ЛФ/ТРКФ виявилося в 1.2 раза нижчим порівняно з контрольними тваринами і дорівнювало 6.09. У кістковій тканині контрольних тварин співвідношення ЛФ/КФ становило 82.3, у тварин II групи співвідношення ЛФ/КФ було вищим в 1.3 раза і дорівнювало 103.3. Паралельне вірогідне зростання активності лужної фосфатази у кістковій тканині та кислої фосфатази у сироватці крові може свідчити про зміни у балансі процесів ремоделювання кісткової тканини, зумовлені впливом мелатоніну.

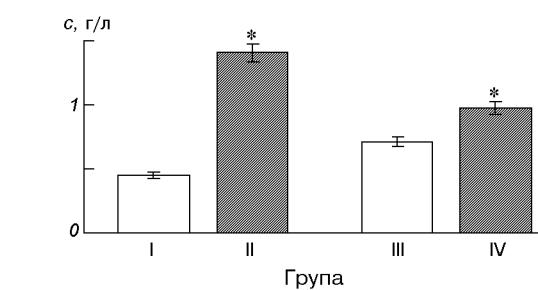


Рис. 5. Значення концентрації c гліказаміногліканів у сироватці крові контрольних (I, III) та дослідних (II, IV) щурів

Підвищення концентрації гліказаміногліканів у сироватці крові характеризує певні порушення метаболізму протеогіканів [4]. Відомо, що гліказаміноглікані забезпечують поперечні зшивки між окремими волокнами колагену. Крім того, вони беруть участь у біосинтезі внутрішньо-кісткового колагену, забезпечують впорядкованість та міцність бічних з'єднань колагенових фібрил. У проведених експериментах нами було зафіксовано вірогідне підвищення концентрації гліказаміногліканів у сироватці крові щурів II групи в 3.1 раза порівняно з вихідними даними (рис. 5), що може призводити до послаблення структурного зв'язку між волокнами колагену у кістковій тканині.

За даними сучасної літератури мінералізація кістки супроводжується якісними змінами гліказаміногліканів — сульфатовані сполуки заміщуються несульфатованими. Існує гіпотеза, згідно з якою у процесі мінералізації гліко-

заміноглікани активно зв'язують Ca^{2+} [5, 13].

Численними дослідженнями показано, що інсуліноподібний фактор росту-І важливий стимулятор процесів новоутворення кісткової тканини *in vivo* та *in vitro* [14, 15]. Поряд з тим цей фактор росту стимулює резорбтивні процеси *in vitro*, впливаючи на дозрівання остеокластів та обумовлюючи формування остеокластів з попередників. Також встановлено пряму кореляцію між рівнем інсуліноподібного фактора росту-І та концентрацією ендогенного мелатоніну [15, 17]. У проведенному нами експерименті введення мелатоніну у добовому мінімумі його природного синтезу викликало лише тенденцію до збільшення рівня експресії мРНК інсуліноподібного фактора росту-І у печінці молодих щурів.

У дорослих 9-місячних щурів активність лужної фосфатази у сироватці крові вірогідно знизилася у 1.6 раза порівняно з контролем (рис. 3), тоді як у кістковій тканині активність цього ферменту була у 2.4 раза достовірно вищою за вихідні дані (рис. 4, а).

Активність кислої фосфатази у сироватці крові та кістковій тканині була достовірно вищою порівняно з контролем в 1.3 та 1.4 раза відповідно (рис. 4, б).

Співвідношення ЛФ/КФ та ЛФ/ТРКФ у сироватці крові контрольних 9-місячних щурів становило 4.83 та 6.05 відповідно. У досліджуваних тварин, яким вводили мелатонін у дозі 1 мг/кг, співвідношення ЛФ/КФ у сироватці крові було у 2.19 раза нижчим порівняно з контролем і дорівнювало 2.2. Співвідношення ЛФ/ТРКФ у тварин цієї групи було в 1.64 раза нижчим порівняно з контрольними даними і дорівнювало 3.7. У кістковій тканині тварин IV групи співвідношення ЛФ/КФ було вищим у 1.6 раза, ніж у контролі, і дорівнювало 65.38.

Введення екзогенного мелатоніну о 17 год супроводжувалося тенденцією до підвищення рівня експресії мРНК інсуліноподібного фактора росту-І у печінці 9-місячних щурів.

Концентрація гліказаміногліканів у сироватці крові досліджуваних щурів була у 1.4 раза вищою порівняно з контролем (рис. 5).

Результати роботи дозволяють зробити висновок про те, що пероральне введення екзогенного мелатоніну у дозі 1 мг/кг у період мінімуму його природного синтезу в організмі дозволяє значно підвищити загальну концентрацію цього

гормону в сироватці крові 3- та 9-місячних щурів на 50 та 25.6 % відповідно. Зростання рівня мелатоніну у сироватці крові як молодих, так і дорослих щурів не супроводжується значними змінами остеометричних показників кістки, проте додаткове введення мелатоніну знижує активність лужної фосфатази у сироватці крові та підвищує її активність у кістковій тканині, а також інтенсифікує темпи резорбції кісткової тканини у молодих та дорослих щурів, про що свідчить підвищення активності кислої фосфатази та концентрації гліказаміногліканів у сироватці крові. Не виключено, що використання екзогенного мелатоніну може бути корисним для стабілізації процесу фізіологічної регенерації кісткової тканини в умовах гіпокінезії і невагомості.

1. Алексеев В. П. Остеометрия. — М.: Наука, 1966.— С. 148—152.
2. Ашофф Ю. Биологические ритмы. — М.: Мир, 1984.— Т. 1.—414 с.
3. Березовський В. Я., Літовка І. Г., Костюченко О. С. Фізіологічна регенерація кісткової тканини за умов дозованої нормобаричної гіпоксії // Фізіол. журн.— 2007.—53, № 6.—С. 40—45.
4. Григорьев А. И., Воложин А. И., Ступаков Г. П. Минеральный обмен у человека в условиях измененной микрогравитации // Пробл. косм. биол. — М.: Наука, 1994.—Т. 74.—214 с.
5. Замботти Д., Балагнани И. Химический состав и обмен хряща и кости // Механизмы регенерации костной ткани. — М.: Медицина, 1972.—С. 113 —118.
6. Кляцкин С. А., Лифшиц Р. И. Определение гликозаминогликанов орциновым методом в крови больных // Лабораторное дело.—1989.—№ 10.—С. 51—53.
7. Куприянович Л. И. Биологические ритмы и сон. — М.: Наука, 1976.—120 с.
8. Літовка І. Г. Вікові особливості реакції кісткової тканини щурів на дозоване зменшення парціального тиску у вдихуваному повітрі // Укр. Мед. Альманах.—2004.—7, № 3 (додаток).—С. 57—59.
9. Руководство по остеопорозу / Ред. Л. И. Беневоленская — М.: Бином, 2003.—524 с.
10. Brosch S., Redlich K., Pietschmann P. Pathogenesis of osteoporosis in rheumatoid arthritis // Acta med. austr.— 2003.—30, N 1.—P. 1—5.
11. Cardinali D. P., Ladizesky M. G., Boggio V. Melatonin effects on bone: experimental facts and clinical perspectives // J. Pineal Res.—2003.—N 34.—P. 81—87.
12. Fernandez-Tresguerres Hernandez-Gil I., Alobera-Gracia M. A., Mariano C. P., Jerez L. B. Physiological bases of bone regeneration II. The remodeling process // Med. Oral. Patol. Oral. Cir. Bucal.—2006.—N 1.—P. 151—157.
13. Frost H. Mathematical elements of lamella bone remodeling. — Springfield: Thomas books, 1964.—127 p.

14. McCarty T. L., Centrella M., Canalis E. Regulatory effects of insulin-like growth factors I and II on bone collagen synthesis in rat calvarial cultures // Endocrinology.—1989.—N 124.—P. 301—309.
15. Ohlsson C., Bengtsson B., Isaksson Olle G. Growth Hormone and Bone // Endocrine Rev.—1998.—19, N 1.—P. 55—79.
16. Ostrowska Z., Kos-Kudla B., Nowak M., et al. The relationship between bone metabolism, melatonin and other hormones in sham-operated and pinealectomized rats // Endocr. Regul.—2003.—37, N. 4.—P. 163—174.
17. Ostrowska Z., Woikowska-Pokrywa K., Kos-Kudla B., et al. Melatonin and bone status // Pol. Merkur. Lekarski.—2006.—21, N 124.—P. 389—393.
18. Roth J. A., Byung-Gook Kim, Fei Song, et al. Melatonin promotes osteoblast differentiation and bone formation // J. Biol. Chem.—1999.—247, N 45.—P. 22041—22047.
19. Wada T., Nakashima T., Hiroshi N., Penninger J. M. RANKL-RANK signalling in osteoclastogenesis and bone disease // Trends Mol. Med.—2006.—12, N 1.—P. 17—25.
20. Wolden-Hanson T., Mitton D. R., McCants R. L., et al. Daily melatonin administration to middle-aged male rats suppresses body weight, intraabdominal adiposity, and plasma leptin and insulin independent of food intake and total body fat // Endocrinology.—2000.—41, N 2.—P. 487—497.

**INFLUENCE OF MELATONIN ON PROCESSES
OF THE BONE TISSUE PHYSIOLOGICAL
REGENERATION OF YOUNG AND ADULT RATS**

*V. A. Berezovskiy, I. G. Litovka, A. S. Kostjuchenko,
R. V. Yanko*

We studied the influence of 28-day administration of exogenous melatonin in a dose of 1 mg/kg on the processes of bone tissue physiological remodeling of 3- and 9-monthly rats-males. It is discovered that an initial concentration of melatonin is higher in adult rats, than in 3-monthly rats. We showed a significant increase of 50 % and 25.6 % in serum melatonin concentration for youths and adult experimental rats, respectively, a significant enhancement of alkaline phosphatase activity in bone tissue for both of the experimental groups of animals, its decline in the serum of 9-monthly rats and the tendency for a decline in 3-monthly ones. The increase of endogenous level of hormone was accompanied by a significant enhancement of acid phosphatase activity by a factor of 1.6 and 1.3 as well as of glicozamino-glikans serum concentrations by a factor of 3.1 and 1.4 for 3- and 9-monthly rats, respectively. IGF-I gene expression level for the animals in both of the groups under investigation had a tendency for an increase. The conclusion is made that administration of melatonin in a dose of 1 mg/kg intensifies considerably the process of bone tissue physiological remodeling both for young and for adult rats.

**45 РОКІВ ВІДКРИТОМУ АКЦІОНЕРНОМУ ТОВАРИСТВУ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ТЕХНОЛОГІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ»**

**Основні історичні дати
становлення та розвитку**

Становлення інституту припадає на початок 1960-х років, які були відмічені черговим витком гонки озброєнь між СРСР і США.

21 жовтня 1963 року, з метою підвищення рівня технології виробництва ракетної техніки, зменшення собівартості, скорочення строків організації нових виробництв у м. Дніпропетровську був створений філіал № 4 Науково-дослідного технологічного інституту (м. Москва) — наказ Голови Державного комітету з оборонної техніки СРСР № 617 від 21.10.1963 р. Територіально філіал розташувався у побутових приміщеннях цехів Південного машинобудівного заводу. Всю роботу філіалу було напрямлено на здійснення технічної допомоги заводу.

1966 р. — рік початку будівництва власного інженерно-лабораторного корпусу на території цеху 69 ПМЗ.

1967 р. — філіал № 4 НДТІ-40 перейменовано на Дніпровський філіал Науково-дослідного інституту технологій машинобудування (м. Москва) скорочено ДФ НДІТМ — наказ по Міністерству загального машинобудування (МЗМ) № 10 від 29.12.1966 р.

1968 р. — на Дніпровський філіал Науково-дослідного інституту технології машинобудування покладено галузеву відповідальність за розробку та запровадження у виробництво устаткування, засобів механізації і технологічних процесів виготовлення теплозахисних покрить РДТТ головних частин спускних апаратів (наказ МЗМ СРСР № 89 від 20.03.1968 р.).

1971 р. — побудовано та введено в експлуатацію інженерно-лабораторний корпус.

1972 р. — ДФ НДІТМ доручено забезпечити розробку технологічних процесів, програм і методик намотування виробів РДТТ (наказ МЗМ СРСР № 160 від 31.05.1972 р.).

1974 р. — за ДФ НДІТМ закріплено головну роль за провадження робіт в МЗМ СРСР за напрямами:

- технології і устаткування для виготовлення деталей, вузлів та систем із теплозахисних і теплоізоляційних полімерних композиційних, вуглець-вуглецевих та інших матеріалів;
- технології нанесення лакофарбових і гальвано-хімічних покрить;
- методи та засоби неруйнівного контролю якості виробів із композиційних матеріалів.

1986 р. — ДФ НДІТМ перейменовано на Дніпровський науково-дослідний інститут технології машинобудування. Він увійшов до складу створеного науково-виробничого об'єднання «Південне» як самостійна структурна одиниця (наказ Міністра МЗМ № 500 від 04.12.1986 р.).

Чисельність інституту з урахуванням базових підрозділів у містах Перм і Павлоград досягла 1900 працівників.

1991 р. — Дніпровський науково-дослідний інститут технології машинобудування перейменовано в Український науково-дослідний інститут технології машинобудування (УкрНДІТМ) (наказ Держоборонпромашу України № 65 від 04.12.1991 р. за Постановою Кабінету Міністрів України № 227 від 24.09.1991 р.).

1995 р. — Український науково-дослідний інститут технології машинобудування перейменовано у Відкрите акціонерне товариство «Український науково-дослідний інститут технології» (ВАТ УкрНДІТМ) (наказ начальника Регіонального відділення фонду Держмайна України по Дніпропетровській області № 12/134-АО від 12.12.1995 р.).

1999 р. — ВАТ УкрНДІТМ прийнято у відання Національного космічного агентства України (НКАУ) і призначено головною організацією з технології виготовлення виробів ракетно-космічної техніки і товарів народного споживання в галузі (розпорядження Кабінету Міністрів України № 236-р від 25 березня 1999 р.).

2000 р. — ВАТ УкрНДІТМ записано в єдиний Державний реєстр підприємств і організацій України під шифром 95120 — наукових організацій галузевого профілю. ВАТ УкрНДІТМ, як провідний науково-дослідний інститут ракетно-космічної галузі, зараховано до підприємств, які мають стратегічне значення для економіки та безпеки України (постанова Кабінету Міністрів України № 1346 від 29.08.2000 р.).

2006 р. — ВАТ УкрНДІТМ увійшло до складу Науково-виробничої групи «Дніпротехсервіс».

2008 р. — ВАТ УкрНДІТМ отримало статус головної організації з виконання науково-технічних робіт з технології виробництва РКТ у галузі машинобудування (утверждено на засіданні колегії НКАУ протоколом № 1/2008-к від 17.01.2008 р.).

— ВАТ УкрНДІТМ внесено в реєстр наукових підприємств, яким надається підтримка держави (свідоцтво № 00812 серії НД від 08.02.2008 р.).

— чисельність інституту складає 130 працівників.

УДК 621

В. С. Зевако, П. Н. Желтов

ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

ОАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»: 45 лет создания и внедрения научноемких технологий в промышленность Украины

Надійшла до редакції 14.07.08

Дана ретроспектива розвитку Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування» — головної організації Національного космічного агентства України в комплексному забезпеченні виробництва ракетно-космічної техніки і виробів народногосподарського призначення за 45 років свого існування. Зроблено огляд основних досягнень і можливостей інституту в області створення і впровадження передових технологій у промислове виробництво.

21 октября 2008 г. открытому акционерному обществу «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ОАО УкрНИИТМ) исполняется 45 лет.

Сейчас это фактически один из немногих сохранившихся научно-исследовательских институтов в Украине, который обладает широким комплексом технологий в области оснащения и оборудования производства узлов и деталей из композиционных материалов, гальвано-химических покрытий, неразрушающих методов контроля, сварки, механической обработки, обеспечения чистоты и герметичности.

Институт был создан в 1963 г. в г. Днепропетровске, где располагались разработчики и изготовители изделий ракетно-космической техники — КБ «Южное» и «Южмашзавод». Он создавался как филиал № 4 Московского НИИ технологии машиностроения (ДФ НИИТМ), которому было поручено отвечать за уровень технологии изготовления изделий РКТ, а также за комплекс-

ное технологическое обеспечение их разработки и изготовления.

В дальнейшем на институт решением Министерства общего машиностроения СССР была возложена отраслевая ответственность за уровень технологии РКТ по следующим направлениям:

- полимерные композиционные материалы и теплозащитные покрытия;
- гальвано-химические покрытия;
- неразрушающие методы контроля качества и толщины.

В период до 1991 г. в институте разработано целый ряд сложных технологических решений и оборудования, которые были использованы при создании и освоении четырех поколений ракет, в том числе известных комплексов «Зенит», «Циклон», Р-36 (SS-18 «Сатана»), РТ-23 и ряда других, которые до настоящего времени по своим параметрам являются непревзойденными в мире.

География предприятий, с которыми работал институт, очень большая: от Прибалтики до Восточной Сибири (Ленинград, Томск, Сафоново, Москва, Пермь, Омск, Оренбург, Ташкент, Миасс, Златоуст, Усть-Катав, Красноярск).

С 1991 г. институт был подчинен Гособоронпроммашу Украины (в дальнейшем Министерству промышленной политики Украины) и стал называться «Украинский НИИ технологии машиностроения».

В 1995 г. Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения переименован в Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ОАО УкрНИИТМ).

С 1999 г. институт в составе Национального космического агентства Украины является головной организацией в комплексном обеспечении технологии производства ракетно-космической техники и изделий народнохозяйственного назначения. С 2006 г. институт вошел в состав научно-производственной группы «Днепротехсервис», где занимается вопросами технологического обеспечения производства таких предприятий как Днепротяжмаш, Днепропетровский завод прокатных валков и др.

Накопленный коллективом института научно-технический опыт создания новых и переоснащения действующих производств может и должен быть использован для решения технологических проблем по выпуску продукции на различных машиностроительных предприятиях.

К числу разработанных нами технологических решений относятся:

по заготовительному производству

- высококачественное литье направленным затвердеванием;
- гибка труб эксцентрической раскаткой в наклонных матрицах;
- изготовление многослойных тонкостенных сильфонов;

по механообрабатывающему производству

- формирование канавок на сложнопрофильных поверхностях;
- создание оребренных и вафельных панелей;
- размерная обработка теплозащитных покрытий;

по производству из ПКМ и ТЗП

- нанесение теплозащитных покрытий;
- нанесение тепло- и экранно-вакуумной изоляции;
- изготовление намоткой изделий типа тел вращения, в том числе шаробаллонов высокой прочности и силовых размерностабильных конструкций;
- создание сотовых заполнителей из различных материалов и трехслойных конструкций на их основе;
- создание теплонагруженных изделий из углерод-углеродных материалов;

по гальванохимическому производству

- бессточные экологически чистые технологии нанесения Cr, Ni, Zn покрытий;
- мерное хромирование деталей;
- тонкослойное меднение «мягких» свинцовых сердечников;
- нанесение гальванопокрытий с помощью твердых электролитов;
- совмещение химической обработки с гидроиспытаниями;
- безотходные технологии переработки твердых и жидких отходов гальванических производств;

по сварочному производству

- электродуговая сварка в защитной среде с комплексом соответствующего оборудования;
- автоматизированная сварка неповоротных стыков труб диаметром 6...600 мм;
- автоматизированная сборка-сварка пространственно сложных трубчатых конструкций;
- электронно-лучевая сварка Al и химически активных металлов (Ti, Nb, Zr);

по сборочному производству

- горизонтальная сборка длинномерных конструкций большой массы;
- клепка крупногабаритных узлов;
- контролируемое обеспечение чистоты внутренних поверхностей и полостей крупногабаритных изделий;
- электродуговое распыление химически активных металлов для создания вакуума,

очистки инертных газов, нанесения металлических, нитридных, карбидных и оксидных покрытий;

по испытательному производству

- комплексный контроль герметичности изделий;
- прочностные испытания;
- контроль выходных геометрических параметров, в т. ч. объемов полостей газовым методом;
- определение массоинерционных и массоцентровочных характеристик;

по неразрушающему контролю

- определение качества заготовок и полуфабрикатов, деталей и узлов из металлических и неметаллических материалов;
- контроль физико-механических характеристик (плотности, содержания связующих, степени поликонденсации диэлектрической проницаемости) неметаллических покрытий;
- толщинометрия стенок металлических и неметаллических изделий, покрытий гальванических и теплозащитных;
- контроль неприкрепления, расслоений, сплошности ТЗП, изделий из ПКМ и КМ;
- метрологическое обеспечение средств НК.

В период выполнения конверсионных программ институтом были разработаны автоматизированные линии изготовления карамели, мороженого, макарон, решены локальные целевые проблемы доочистки питьевой воды и др.

О перспективах возможного сотрудничества можно судить по номенклатуре разработанных нами и реализованных технологических решений в производстве узлов ракет-носителей. Так, например, для изготовления топливного бака ракеты-носителя на жидком топливе из алюминиевого сплава нами разработаны технологии и оборудование, которые обеспечивают:

- формирование ваффельных обечаек для снижения веса в 2...3 раза при сохранении прочностных свойств и герметичности оболочки бака;
- сварку (продольные и кольцевые швы) бака с толщиной свариваемых деталей до 30 мм;
- механизированную очистку внутренних поверхностей и полостей бака от жировых ($30-50 \text{ мг}/\text{м}^2$) и механических ($0.1-0.2 \text{ мг}/\text{м}^2$)

загрязнений с гарантированным объективным контролем уровня остаточных загрязнений;

- контроль суммарной негерметичности с локализацией, в случае необходимости, месттечей, их устранение путем подварки и герметизации сварных швов нанесением герметиков для обеспечения уровня протечек до $1...3 \text{ см}^3/\text{год}$ в баках объемом до 100 м^3 ;
- обмер внешней геометрии бака с точностью до 0.2 мм на длине 20 м при диаметре до 4 м;
- измерения полного объема бака с точностью до 0.2 %;
- механизированное нанесение внешней теплоизоляции на криогенные (жидкий кислород, водород) баки.

При изготовлении корпусов твердотопливных ракетных двигателей разрабатывались технологии и оборудование для:

- изготовления песчано-полимерных оправок;
- намотки и полимеризации и сушки корпусов;
- нанесения внутренней теплоизоляции;
- проведения прочностных гидроиспытаний;
- формирования базы внешней геометрии для последующейстыковки корпуса двигателя с элементами соплового блока, насадком, межступенными отсеками или другими узлами ракеты.

В последние 10—15 лет значительная часть разработок института направлена на решение различных технологических задач предприятий Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья, в частности России, Беларуси, Узбекистана, Казахстана, Китая, Франции. Мы решаем вопросы разработки создания и усовершенствования ряда производств, цехов и участков в различных отраслях промышленного производства. Широкое распространение в Украине (от Мариуполя до Львова) получило разработанное нами оборудование и запчасти к нему для производства карамели и мороженого. Не менее обширна география (от Краснодона и Луганска до Шостки и Витебска) внедрения технологий гальванических покрытий: мерное хромирование; ресурсосбережение в гальванических ваннах, оснащенных титановыми нагревателями; меднение абразивных кругов; бронзовые покрытия свинцовых пуль и многое другое. Сварочные технологии и оборудование внедрены в Нижнем Новгороде (РФ), Николаеве, Днепропетровске, Запорожье. Для заказчика из Китая создана и

внедрена автоматизированная установка контроля качества резинометаллического корпуса, на базе которой создана система для контроля неприkleя и расслоений заполненного изделия для Павлоградского химзавода. Растет необходимость в создании теплоизоляционных покрытий, сотовых заполнителей и конструкций на их основе. Расширяется круг предприятий, требующих аккредитации метрологических подразделений.

Таким образом, сегодня наш институт имеет все возможности для разработки и реализации комплексных решений технологических проблем машиностроения, для создания и организации производств новой конкурентоспособной продукции. Мы можем разрабатывать технологии и изготавливать оборудование для совершенствования практически всех технологических переделов машиностроительного комплекса, изготавливающего сельхозтехнику; оборудование для пищевой и перерабатывающей промышленности; транспортные средства (авиация, автобусы, троллейбусы); средства контроля и технологического оснащения для энергетики, нефтегазовой отрасли (емкости, трубопроводы, магистрали, запорно-регулирующая арматура); специальное оснащение для горнодобывающей и металлургической промышленности (трубы, шланги, вакумные фильтры, магнитные сепараторы); аппаратуру медицинского назначения. Всем предприятиям машиностроения мы можем оказать помощь в решении проблем ресурсоэнергосбережения, улучшения экологической обстановки, неразрушающего контроля качества и толщино-метрии изделий из металлов и неметаллов, метрологического обеспечения средств контроля и дефектоскопии, аттестации и аккредитации метрологических служб и подразделений.

Научный задел института за 45 лет работы формировался несколькими поколениями научных и специалистов-технологов совместно со специалистами десятков предприятий-разработ-

чиков, изготавителей, смежников.

Мы благодарны сотням и тысячам специалистов ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» (г. Днепропетровск), ГП ПО «Южный машиностроительный завод им. А. М. Макарова» (г. Днепропетровск), ГП «Углекомпозит» (г. Запорожье), ФГУП ВМЗ КБХА (г. Воронеж), ГНП РКЦ «ЦСКБ — Прогресс» (г. Самара), ГРЦ «КБ им. академика В. П. Макеева» (г. Миасс, Челябинская обл.), НПО «Техномаш» (г. Москва), ЦНИИмаш (г. Королев, Московская обл.), ОАО НПО «Искра» (г. Пермь), ОАО НПО «Композит» (г. Королев, Московская обл.), ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева» (г. Королев, Московская обл.) а также специалистам многих других предприятий за совместную работу по созданию и внедрению передовых технологий в промышленное производство.

Надеемся, что разработки нашего института, как самостоятельные, так и в кооперации с другими предприятиями, будут востребованы и станут полезны машиностроительному комплексу в совершенствовании его производств и в повышении качества выпускаемой им продукции.

PUBLIC JOIN STOCK COMPANY “UKRAINIAN SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF MANUFACTURING ENGINEERING” — 45 YEARS OF CREATION AND APPLICATION OF HIGH TECHNOLOGY TO UKRAINE INDUSTRY

V. S. Zevako, P. N. Zheltov

The 45-th year history of Public Joint Stock Company «Ukrainian Scientific Research Institute of Manufacturing Engineer» is retrospective reviewed. The Institute is head organization of National Space Agency of Ukraine. The Institute tasks are complex ensuring of space-rockets and civil production. This paper presents a review of main Institute achievements and potentials of creation and application of high technology to industrial production.

А. А. Погорелов¹, П. Н. Желтов¹, Л. П. Семенов²

¹ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

Основные направления развития технологий неразрушающего контроля в ракетно-космической отрасли

Надійшла до редакції 14.07.08

Сформульовано проблемні питання технологій неруйнівного контролю, що виникають при створенні сучасної ракетно-космічної техніки.

Ракетно-космическая отрасль является «локомотивом» технологий. Современный ракетоноситель представляет сложнейшую техническую систему, в состав которой входит более 60 000 наименований деталей, изготовленных из различных конструкционных материалов. При производстве ракеты используется более 1000 различных технологических процессов, в том числе и технологии неразрушающего контроля.

Задачи, возникающие при создании ракеты-носителя, стимулируют развитие новых технологий. Поэтому каждая новая машина выбирает в себя самые передовые технологические решения. Опыт и знания, полученные при решении технологических задач в ракетно-космической отрасли, формируют новые подходы к рассмотрению традиционных технологических процессов в других отраслях. Внедрение «космических» технологий позволяет получать новые качества товаров и создавать дополнительные конкурентные преимущества существующим производствам.

Украина является космическим государством, которое имеет полный цикл разработки и производства ракетно-космической техники. В настоящее время осваивается производство ракеты-носителя «Циклон-4», разрабатываются ветроэнергетические установки большой мощности, ведутся работы по модернизации существующих

носителей. Выполнение этих проектов актуализирует ряд задач в области методов и средств неразрушающего контроля. Учитывая сложность и важность этих задач, можно предположить, что их решение будет определять направления развития неразрушающего контроля в отрасли на обозримую перспективу.

Цель предлагаемой статьи состоит в том, чтобы информировать научную общественность о существующих проблемных вопросах. Будут рассмотрены только те задачи, которые в настоящее время не имеют технического решения или решены не в полном объеме.

ЦИФРОВАЯ РАДИОГРАФИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

Радиографический (рентгеновский) метод является основным методом неразрушающего контроля сварных соединений конструкций ракеты [3]. Объектом контроля выступают сварные конструкции, выполненные из материала АМг-6 с толщинами от 2.0 до 6.0 мм. Общая протяженность сварного шва, например для носителя «Циклон-4», составляет 686 м. Здесь контролируются дефекты типа трещины (продольные и поперечные) в наплавленном и в основном металле, непровары, газовые включения (поры), шлаковые и вольфрамовые включения, подрезы,

проплавы и прожоги [2, 3]. Учитывая ответственность изделия, контролю подлежит 100 % сварного шва. В настоящее время контроль производится традиционным способом с использованием рентгеновской пленки, что приводит к большим финансовым и трудовым затратам. Минимизация затрат и повышение конкурентоспособности готового изделия возможны при переходе на автоматизированные системы радиографического контроля без использования рентгеновской пленки. Данную проблему частично решает применение гибких фосфорных пластиноч для регистрации рентгеновского излучения и автоматизированной системы обработки изображений и идентификации дефектов. Однако при контроле протяженных сварных швов этот подход нельзя считать технологически оптимальным.

Оптимальное решение проблемы контроля протяженных сварных швов видится на пути создания автоматизированной системы цифровой радиографии. Обобщенная структурная схема такой системы приведена на рис. 1. Автоматизированная система должна выполнять перемещение излучателя и детектора вдоль поверхности сварного шва, автоматически определять параметры экспозиции, управлять процессом экспозиции, осуществлять обработку изображений и идентифицировать дефекты, протоколировать результаты контроля.

Ключевым элементом системы, определяющим возможность ее создания, является твердотельный цифровой регистратор рентгеновского

излучения. В настоящее время есть целый ряд твердотельных детекторов рентгеновского изображения, но их параметры (пространственная разрешающая способность и относительная чувствительность) уступают традиционной рентгеновской пленке, что ограничивает применение этих устройств для контроля сварных швов. Совершенствование детекторов продолжается, но качественно новых результатов можно достичь при переходе на новые физические методы детектирования.

Таким образом, на сегодняшний день актуальной является задача разработки цифровых детекторов рентгеновского излучения с высоким пространственным разрешением и относительной чувствительностью, достаточными для обеспечения контроля сварных швов.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТОНКИХ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ДОСТУПЕ К ПОВЕРХНОСТИ

Данная задача возникает при контроле так называемых замыкающих сварных швов. На рис. 2 приведены эскизы сварных швов бака третьей ступени носителя «Циклон-4».

Конструкция бака не позволяет реализовать рентгеновский контроль сварного шва. В данном случае необходимо применение ультразвуковых методов контроля, регламентируемых документом [4].

Для повышения весовой эффективности кон-

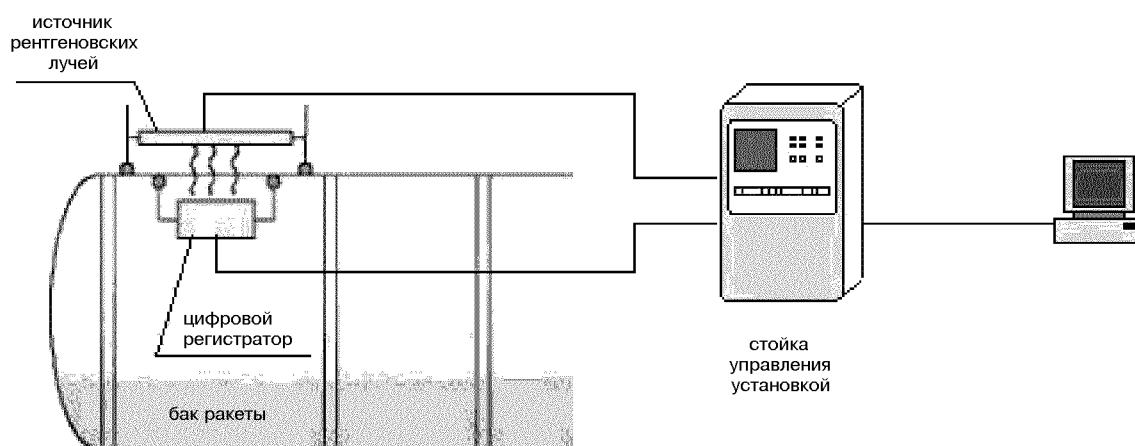


Рис. 1. Обобщенная структурная схема автоматизированной системы цифрового радиографического контроля

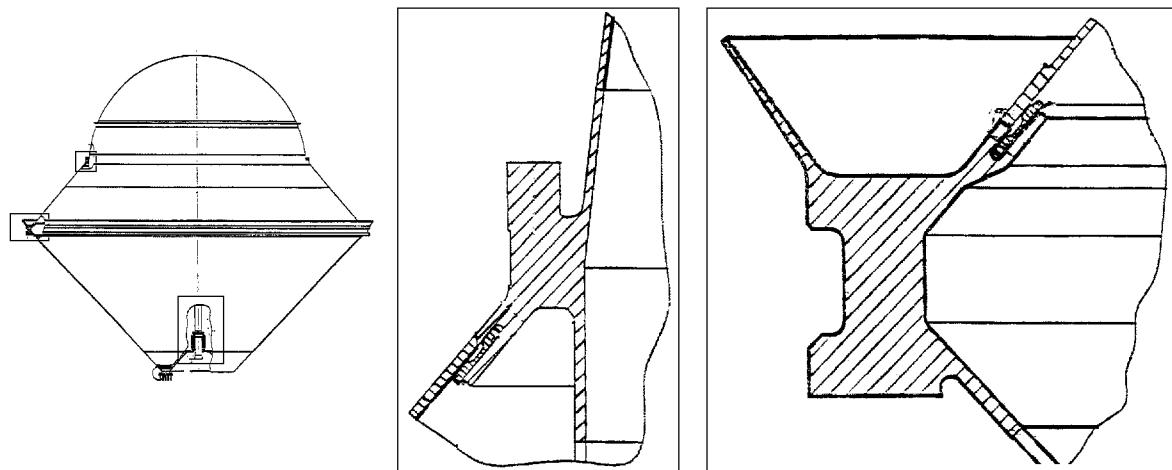


Рис. 2. Эскизы замыкающих сварных швов

структур целесообразно уменьшать толщину стенки бака. Прочностные характеристики конструкции обеспечиваются оптимизацией формы и использованием упрочняющих покрытий. В рамках данной тенденции проектируются баки с толщиной стенки от 1.0 мм. В тоже время действующие нормативные документы регламентируют контроль сварных швов с толщиной основного металла от 4.0 мм и выше. Очевидно, что решение данной задачи контроля возможно при переходе на более высокие рабочие частоты ультразвуковых колебаний (от 7 МГц и выше) и при использовании наклонных преобразователей с большим углом ввода [6].

Таким образом, рассмотренная технологическая задача определяет перспективное направление в разработке средств ультразвукового неразрушающего контроля, состоящее в повышении рабочих частот и создании наклонных преобразователей с большим углом ввода и минимальным уровнем реверберационных шумов.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В современных ракетах-носителях важным элементом конструкции является теплоизоляционное и теплозащитное покрытие. Теплоизоляционное покрытие наносится на металлическую

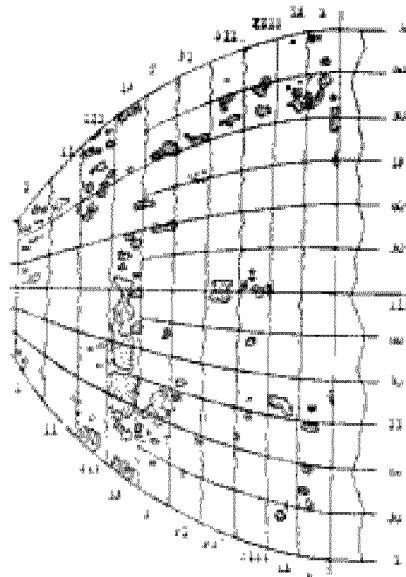


Рис. 3. Фрагмент карты дефектов

стенку бака или на трубопровод с криогенными компонентами. Сейчас в качестве теплоизоляционных покрытий используются разновидности пенополиуретана. Толщина такого покрытия может составлять 60 мм и более. Теплозащитное покрытие применяется для защиты корпуса твердотопливного двигателя. Теплозащитное покрытие, как правило, выполняется из резины. Толщина покрытия составляет 1—20 мм.

Повышение требований к конструкции ракеты ставит задачу контроля kleевого соединения между покрытием и основанием. В общем случае задача состоит не только в обнаружении мест нарушения адгезии, но и в количественной оценке степени адгезии на бездефектных участках. Задача усложняется требованием проведения контроля при одностороннем доступе к конструкции.

На сегодняшний день есть технологии неразрушающего контроля покрытий, которые частично решают поставленную задачу. Например, для контроля теплоизоляционного покрытия на основном баке ракеты-носителя «Энергия» были разработаны специальные акустические дефектоскопы.

На рис. 3 представлен фрагмент карты дефектов, выявленных при контроле одного из баков.

Для контроля теплозащитного покрытия на металлическом корпусе твердотопливного ускорителя была разработана автоматизированная установка УКК. Внешний вид установки представлен на рис. 4. Установка реализует теневой метод ультразвукового контроля.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Неметаллические композиционные материалы широко используются в конструкциях ракет-носителей. Существует тенденция замены металлических конструкций на конструкции, изготовленные из неметаллических материалов. В частности, сейчас изучается вопрос создания баков для криогенных компонентов топлива, изготовленных из полимерно-композиционных материалов. Перспективной конструкцией также является сопло двигателя «космической» ступени носителя, изготовленное из углерод-углеродного композиционного материала.

Наиболее сложным объектом, который изготавливается из полимерно-композиционного материала, сейчас есть лопасть ветроэнергетической установки. В настоящее время промышленным способом изготавливаются лопасти длиной до 25 м. Но наиболее эффективными считаются ветроэнергетические установки с лопастью длиной до 48 м (в перспективе — до 60 м).

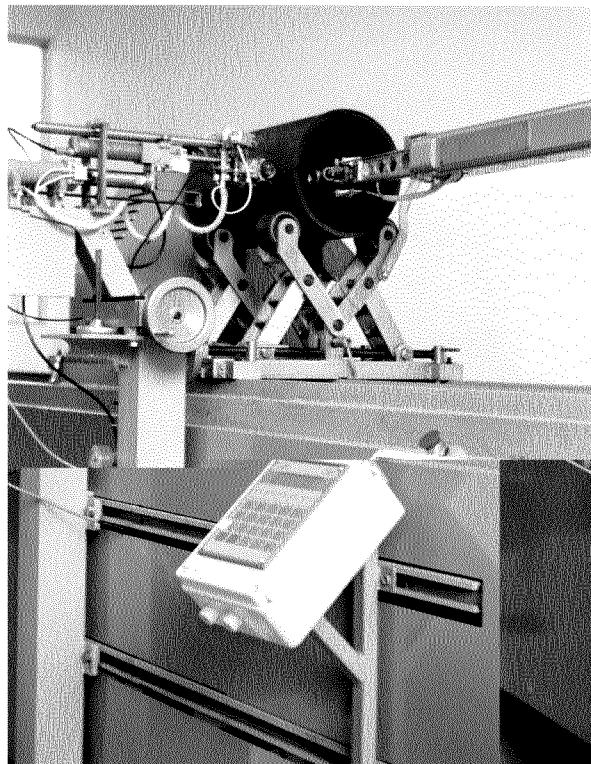


Рис. 4. Внешний вид установки УКК

Основные требования к информационным возможностям метода контроля неметаллических композиционных материалов заключаются в обнаружении и локализации дефекта, классификации дефекта и оценке его размеров. Данные требования обусловлены тем, что контролируемые изделия являются крупногабаритными и дорогостоящими. Наличие полной информации о дефектах позволит осуществить оптимальный ремонт изделия.

На сегодняшний день нет апробированного метода неразрушающего контроля, который бы позволял в полном объеме решать поставленную задачу. Как одно из перспективных направлений поиска решения может служить использование многочастотных ультразвуковых методов контроля [5, 8].

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Современная тенденция контроля и диагностики конструкций состоит в переходе от задач обнаружения дефекта к задачам предсказания появления дефекта. Важным звеном в алгоритмах предсказания является знание распределения остаточных (начальных) механических напряжений в конструкции. Сейчас задача контроля остаточных напряжений в общем случае заключается в количественной оценке напряжений и определении распределения напряжений в объеме конструкции. Данная информация в конечном итоге позволит оценивать надежность конструкций без выполнения дорогостоящих разрушающих испытаний.

В качестве базового нормативного документа, регламентирующего измерения остаточных напряжений, используется стандарт [7]. Используемые в настоящее время методы неразрушающего контроля остаточных напряжений [1] в основном дают качественную оценку распределения напряжений. Достоверность количественных результатов измерений, полученных данными методами, не исследовалась.

Работы в области неразрушающих методов контроля остаточных напряжений составляют одно из перспективных направлений исследований.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Необходимо отметить следующие тенденции в развитии технологии неразрушающего контроля, которые должны быть отражены в современных разработках.

Во-первых, решение задач неразрушающего контроля должно строиться на комплексном использовании различных методов. Таким образом, можно повысить информативность и достоверность результатов контроля.

Во-вторых, современные методы и средства должны обеспечивать полную автоматизацию контроля для минимизации влияния человеческого фактора.

1. Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1989.—254 с.
2. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — Введ. 01.01.84 до 31.12.12.
3. ОСТ 92 1114-80. Соединения сварные. Общие технические требования. — Введ. 01.07.81 до 31.12.12.
4. ОСТ 92 1173-87. Соединения сварные. Методы ультразвукового контроля. — Введ. 01.07.88 до 31.12.12.
5. Погорелов А. А. Метод многочастотной ультразвуковой спектрально-временной дефектоскопии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 1998.
6. РД 34.17.302-97. Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения. — Введ. 01.01.82 до 31.12.12.
7. ASTM E 837-01. = Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain — Gage Method. — США.
8. Stepinski T., Engholm M. Narrowband Ultrasonic Spectroscopy for Inspecting Multilayerd Aerospace Structures // Proc. ECNDT 2006. — Berlin, 2006.

THE MAIN LINES OF NDT DEVELOPMENT IN SPACE-ROCKETS TECHNIQUES

A. A. Pogorelov, P. N. Zheltov, L. P. Semenov

The main problems of NDT technologies in modern space-rockets techniques are formulated.

УДК 531.73:629.76

Е. М. Алексеев¹, М. Н. Хвостов¹, Б. П. Ефимчук¹, В. П. Волков²

¹ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

²ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова», Дніпропетровськ

Безжидкостное измерение объемов узлов ракетно-космической техники

Надійшла до редакції 14.07.08

Розглянуто методи безрідинного визначення об'ємів внутрішніх порожнин вузлів ракетно-космічної техніки та подано схеми вимірювань на їхній основі. Запропоновано шляхи удосконалення методів, спрямовані на досягнення високої точності. Приведено розрахунково-аналітичні і графічні залежності для визначення величини об'ємів і оцінки похибки вимірювань.

К настоящему времени разработан и широко используется в производстве целый ряд безжидкостных методов измерения величины объема внутренних полостей различных узлов ракетно-космической техники (РКТ). Из известных методов и устройств наиболее широкое применение нашли газодинамический, газовый ампульный и газостатический методы.

Сущность газодинамического метода заключается в том, что измеряемый объем откачивается через магистраль известной малой проводимости (с установленным дросселем), при этом фиксируется время τ истечения газа из объема. Измеряемый объем в общем случае определяется как [2]

$$V_{\text{изм}} = k_m f(\tau, p, T), \quad (1)$$

где k_m — калибровочный коэффициент откачки магистрали, $f(\tau, p, T)$ — функция времени истечения газа из объема и параметров состояния газа.

Для повышения точностных параметров газодинамического метода система оснащается, как правило, эталонной емкостью, объем которой определен с требуемой точностью. Измеряемая и эталонная емкости, заполняемые одинаковым

газом, откачиваются через одну и ту же магистраль, каждая ветвь которой содержит дроссель. При условии равенства показателей политропы газа в измеряемой и эталонной емкостях $m(\tau)_e = m(\tau)_{\text{изм}}$, а также равенства отношений начальной и конечной величин давлений в этих емкостях $(P_1/P_2)_e = (P_1/P_2)_{\text{изм}}$ величина объема определяется по формуле

$$V_{\text{изм}} = V_e \frac{\tau_{\text{изм}}}{\tau_e} \sqrt{\frac{T_{\text{изм}}}{T_e}}, \quad (2)$$

где V_e — объем эталонной емкости, $\tau_{\text{изм}}$ — время истечения газа из измеряемого объема, τ_e — время истечения газа из эталонной емкости, $T_{\text{изм}}$ — усредненная температура газа в измеряемом объеме, T_e — усредненная температура газа в эталонной емкости.

Схема системы измерения объема газодинамическим методом с использованием эталонной емкости представлена на рис. 1.

К недостаткам газодинамического метода следует отнести:

- относительную сложность его проведения, связанную с необходимостью изготовления и калибровки дросселя, выполняемого в виде сопла Лаваля;

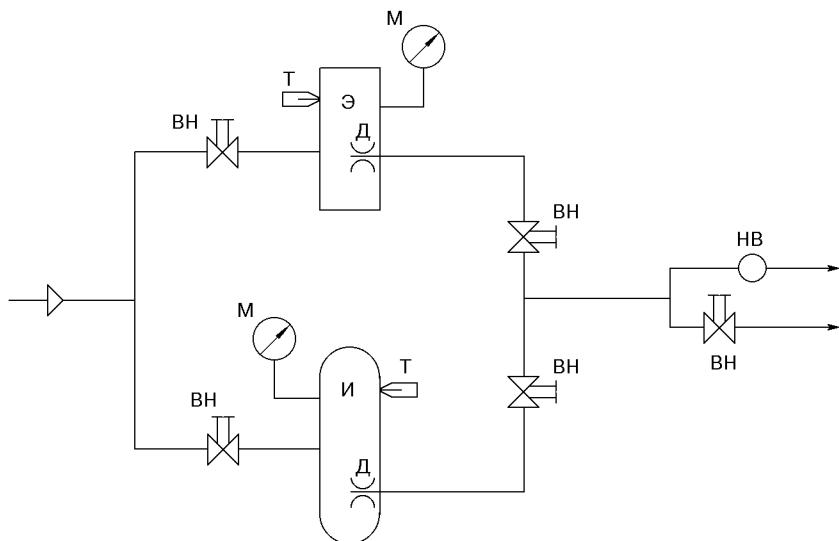


Рис. 1. Принципиальная схема системы измерения объемов газодинамическим методом: И — измеряемая емкость, Э — эталонная емкость, ВН — вентиль, М — манометр, Т — термометр, Д — дроссель, НВ — насос вакуумный

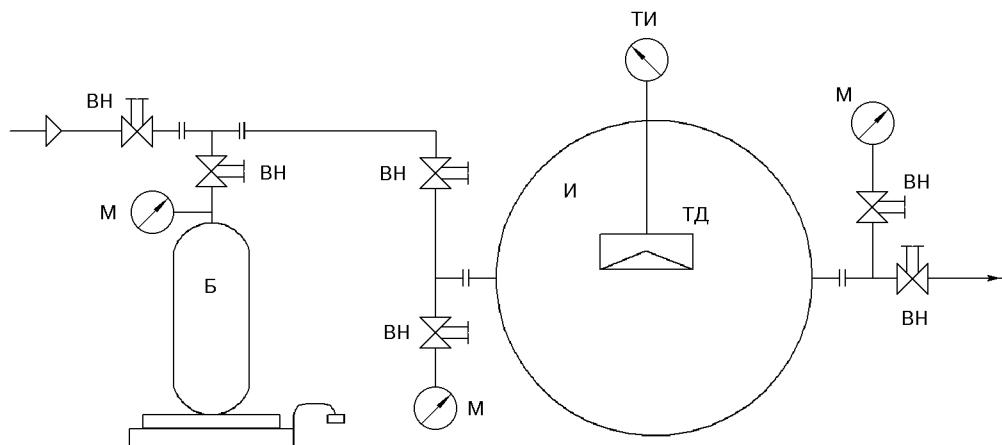


Рис 2. Принципиальная схема системы измерения объемов газовым ампульным методом: И — измеряемая емкость, Б — баллон, ВН — вентиль, М — манометр, ТД — термодатчик, ТИ — измеритель температуры

- необходимость экспериментального определения коэффициента политропности и коэффициента сопротивления магистралей, соединяющих контролируемую емкость с дросселем;
- сходимость результатов этого метода, как любого динамического метода, представляется более низкой, чем в методах, связанных с измерением статических параметров.

Газовый ампульный метод измерения объемов замкнутых герметичных емкостей обладает довольно высокой точностью измерения. Он используется в основном для измерения объемов крупногабаритных емкостей, во внутренних полостях которых могут быть размещены датчики для измерения средней температуры в измеряемом объеме. Метод подробно изложен в отраслевом стандарте ОСТ 92-5116-89 [1].

Суть газового ампульного метода, который относится к наиболее точным методам измерения объема, состоит в следующем.

Технологический баллон (т. н. ампула) наддувается сжатым воздухом до определенного давления, определяется его масса весовым способом с допустимой погрешностью взвешивания ± 0.1 г, после чего этот баллон подстыковывается к измеряемой емкости, в которой измеряются начальные значения температуры и давления, и производится перепуск сжатого воздуха из технологического баллона в измеряемую емкость (при этом масса газа, заправленного в технологический баллон, должна обеспечивать достижение давления в измеряемой емкости после перепуска не менее 1000 кПа). После перепуска производится технологическая выдержка в течение не менее 1 ч для стабилизации температуры и давления в измеряемой емкости. Затем измеряются конечные значения температуры и давления, после чего отстыковывается технологический баллон и определяется его масса, а масса газа, поступившего после перепуска в измеряемую емкость, определяется как разность между массой технологического баллона, заполненного сжатым воздухом до перепуска, и массой баллона после перепуска. Величина объема измеряемой емкости определяется по измеренным пара-

метрам давления и температуры до и после перепуска, а также по массе воздуха, поступившего в измеряемую емкость после перепуска.

Схема системы измерения объемов газовым ампульным методом представлена на рис. 2.

Как уже отмечалось выше, этот метод хорошо зарекомендовал себя при определении объемов крупногабаритных емкостей во внутренних полостях которых можно разместить датчики температуры.

Объем V измеряемой емкости вычисляют по формуле

$$V = \frac{G \cdot R \cdot Z}{\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1}} V_{\text{д}} - V_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где G — масса воздуха, поступившего в емкость технологического баллона (ампулы), R — газовая постоянная воздуха, которым заправляют технологический баллон ($R = 287.096$ Дж/кг·К), Z — коэффициент сжимаемости воздуха в соответствии с графиками ОСТ 92-5116-89, T_1 , T_2 — значения абсолютной температуры в измеряемой емкости до и после перепуска, P_1 , P_2 — значения абсолютного давления в измеряемой емкости до и после перепуска, $V_{\text{д}}$ — объемная деформация измеряемой емкости, соответствую-

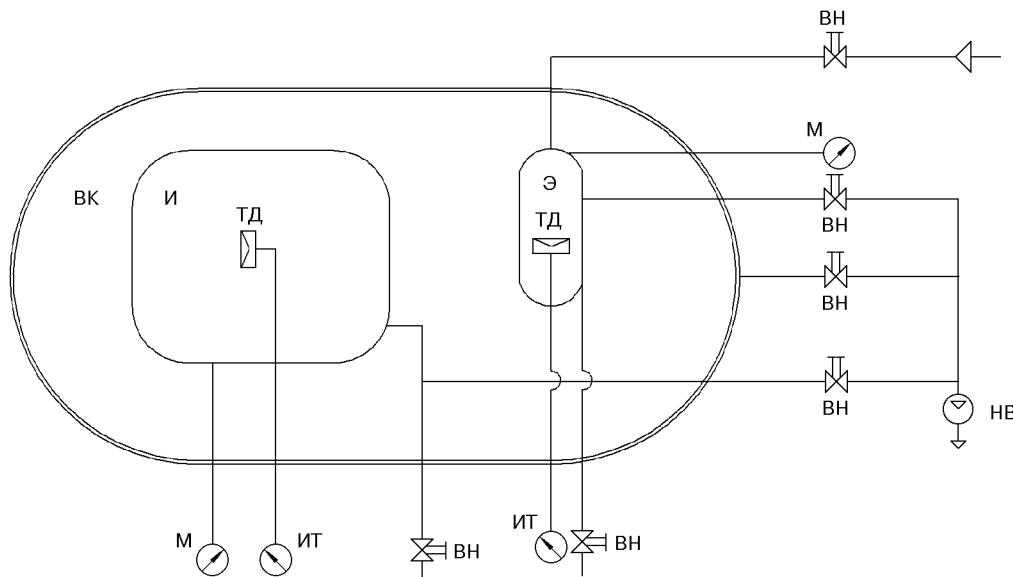


Рис. 3. Принципиальная схема системы измерения объемов газостатическим методом: И — измеряемая емкость, Э — эталонная емкость, ВН — вентиль, ВК — вакуумная камера, М — манометр, НВ — насос вакуумный, ТД — термодатчик, ИТ — измеритель температуры

щая избыточному давлению наддува (определяется в соответствии с приложением к ОСТ 92-5116-89), V_{tp} — объем соединительных линий.

Для определения величины объема узлов небольших размеров (например, системы термостатирования, которые все чаще применяются в ракетно-космической технике для особо точных приборных узлов, систем наведения) используется газостатический метод, основанный на перепуске газа из контролируемой емкости в эталонную и измерении начального и конечного давлений в емкостях. Этот метод в исходном состоянии менее точен, чем ампульный метод, но нашел более широкое распространение из-за своей простоты и универсальности, а его точностные характеристики можно улучшить как путем совершенствования метода, так и за счет увеличения количества контролируемых параметров. Один из путей совершенствования метода, заключающийся в вакуумировании эталонной емкости перед проведением измерений, был реализован при измерении узлов объемом до 10 литров.

Дальнейшее совершенствование этого метода направлено на повышение точностных характеристик при измерении узлов объемом до 6 м^3 с высокой упругой деформацией и базируется на

широком использовании вакуумирования как путем размещения контролируемого узла в вакуумной камере, так и удалением газов из полостей эталонной и измеряемой емкостей, что позволяет:

- расширить диапазон рабочих давлений в полости измеряемых узлов с минимизацией их деформационных изменений;
- приблизить свойства рабочей газовой среды к свойствам идеального газа путем заполнения эталонной емкости от сети высокого давления с низкой точкой росы;
- уменьшить количество контролируемых параметров (начальное давление и температура газа) после вакуумирования полостей;
- минимизировать процесс внешнего теплообмена и сократить, тем самым, время стабилизации рабочих параметров газа после перепуска.

Принципиальная схема системы измерения объемов емкостей газостатическим методом с использованием средств вакуумирования представлена на рис. 3. Датчик измерения температуры должен располагаться в геометрическом центре измеряемой полости, а в случае невозможности такого размещения в объеме устанавливаются четыре датчика, соединенные по последовательно-параллельной схеме. Величина измеряемого объема вычисляется по формуле

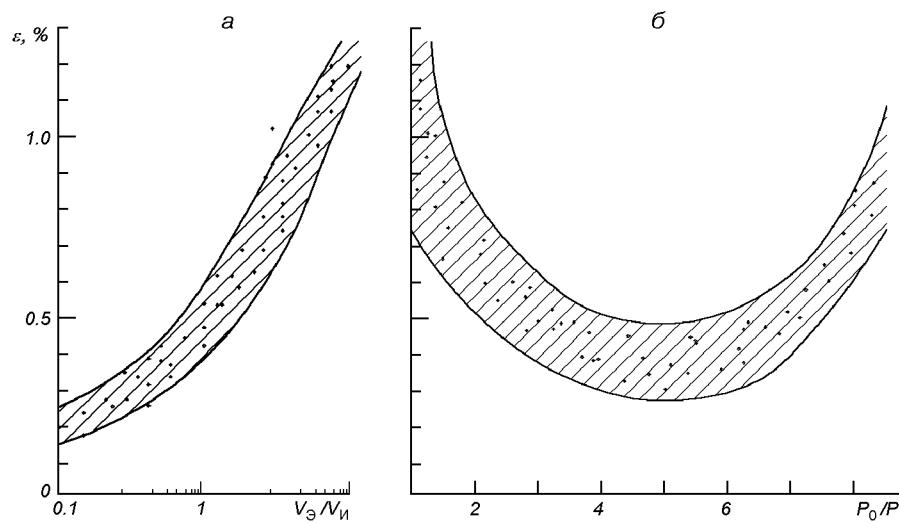


Рис. 4. Зависимость погрешности ε измерения объема: *a* — от соотношения объемов эталонной и измеряемой емкостей, *б* — от соотношения начального и конечного давлений

$$V_{изм} = V_e T_x \left(\frac{P_0}{P \cdot T_0} - \frac{1}{T_e} \right) - V_{tp}, \quad (4)$$

где $V_{изм}$ — объем измеряемой полости, V_e — объем эталонной емкости, T_x — температура газа в измеряемой полости, T_0 — исходная температура газа в эталонной емкости, T_e — стабилизированная температура газа в эталонной емкости после перепуска, P_0 — исходное давление газа в эталонной емкости, P — давление газа в полостях после перепуска, V_{tp} — объем соединительных трубопроводов.

Результаты расчетно-аналитической оценки погрешности измерения объемов газостатическим методом, зависящей от погрешностей измерения объема эталонной емкости и параметров газа до и после перепуска, показывают (рис. 4), что высокий уровень точности 0.2 % может быть достигнут при использовании эталонной емкости объемом 0.1—0.3 от величины измеряемого объема, а соотношение давления газа до и после перепуска должно быть в пределах 3—5.

ВЫВОДЫ

1. Имеющийся арсенал безжидкостных методов определения объемов замкнутых полостей вполне достаточен для решения любых производст-

венных задач как по точностным характеристикам, так и по производственно-технологическим показателям.

2. Усовершенствованный на основе использования средств вакуумирования газостатический метод также обеспечивает достижение высоких точностных характеристик процесса и может быть использован для определения объемов конструктивно неограниченных изделий в любой отрасли техники.

1. ОСТ 92-5116-89. Емкости герметичные изделий. Типовой технологический процесс измерения объемов газовым ампульным методом. — Введ. 01.07.90 до 30.06.12.
2. ОСТ 92-5136-90. Емкости герметичные изделий. Типовой технологический процесс контроля объемов газодинамическим методом. — Введ. 01.01.92 до 30.06.12.

NON-LIQUID MEASUREMENT OF VOLUMES OF UNITS OF SPACE AND MISSILE TECHNOLOGY

*E. M. Alexeev, M. N. Khvostov, B. P. Efimchuk,
V. P. Volkov*

We consider the existing methods for non-liquid determination of volumes of interior cavities of the units of space and missile technology and present process measurement schemes. Some ways to improve the methods are offered to achieve high-precision characteristics of measurements. Analytic-calculated and graphic relationships for determination of volumes and estimation of errors of measurements are given.

А. Б. Лившиц, Ю. А. Дон, П. Н. Желтов

ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

Энергосберегающее наноанодирование алюминиевых сплавов

Надійшла до редакції 14.07.08

Розроблено новий енергоощадний прискорений спосіб нанесення нанооксидних покріттів (НАнОкс) алюмінієвих сплавів. Висока антикорозійна стійкість покріттів НАнОкс забезпечується їхньою безспористістю та високою стійкістю безводного оксиду алюмінію. Покріття НАнОкс універсальні і рекомендуються для антикорозійного захисту практично усіх деталей та поєднань із різними алюмінієвими сплавами, у тому числі для напусних, клеезварніх з'єднань та алюмінієвих вузлів з сталевими деталями. Впровадження процесу наноанодування дозволить в десятки разів скоротити енергетичні витрати та виробничі потужності при одночасному поліпшенні екологічної безпеки робіт.

Анодирование алюминиевых сплавов в стандартных сернокислотных электролитах является одним из наиболее масштабных гальванических процессов в ракетно-космической и самолетостроительной отраслях промышленности. Существующие проблемы сернокислотного анодирования в основном обусловлены высокими затратами электрической и тепловой энергии, расходуемых на электролиз, нагрев и вентиляцию многокубовых ванн. Для среднего предприятия (70—80 тыс. м² покрытий в год) расход энергии на анодирование составляет более 1 млн кВтч/год.

В ОАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» разработан новый экологически безопасный энергосберегающий способ нанесения антикоррозионных наноанодооксидных покрытий (НАнОкс) взамен стандартных анодоокисных покрытий, наполненных в воде (Ан.Окс.н/в) или в хромпике (Ан.Окс.нхр).

Покрытие НАнОкс осуществляется при анодной поляризации деталей в растворе солей 3-валентного хрома с буферными и поверхностноактивными добавками. На поверхности алюминиевого анода в этих условиях осаждаются ультратонкие бесспористые покрытия негидратиро-

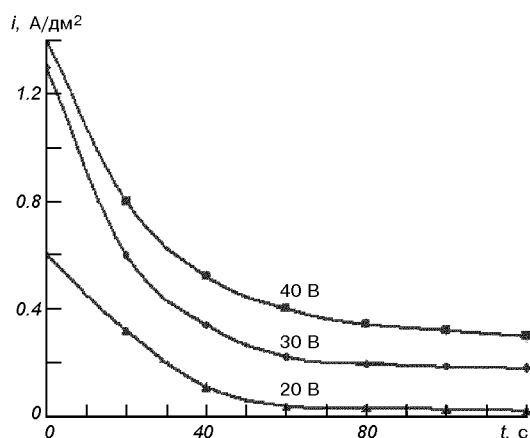
ванного кристаллического оксида алюминия. Кинетика процесса нанесения покрытий НАнОкс характеризуется $I = T$ зависимостями (плотность тока — время), снятыми в потенциостатическом режиме (рисунок).

С увеличением напряжения на электродах скорость процесса увеличивается. Максимальная скорость соответствует напряжению 40 В. Дальнейшее увеличение напряжения выше 50 В приводит к возникновению на поверхности деталей «питтинговых» растрывов. При напряжении 40 В ниспадающий участок кривой (первые 60—90 с электролиза) соответствуют максимальной скорости увеличения толщины оксидного покрытия, которое является результатом взаимодействия алюминиевого анода с водой:



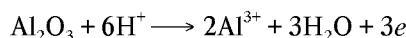
Выход по току образования оксида алюминия на этом участке составляет более 90 %.

Соли 3-валентного хрома непосредственно не участвуют в электродных реакциях. Их наличие необходимо для расширения пределов рабочих напряжений. С увеличением толщины покрытия положительный потенциал анода увеличивается. Создаются условия для протекания побочных реакций — растворения оксида алюминия и

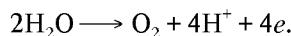


Электрокинетические зависимости при анодной поляризации сплава Д16, плакированного

выделения кислорода:



и



В результате побочных реакций скорость роста покрытия уменьшается и практически приостанавливается через 2.5—3 мин, при толщине покрытия более 100 нм.

Толщина оксидного покрытия, определенная гравитационным способом, для напряжений 20, 30, 40 В ($T = 2.5$ мин) составляет соответственно 60, 82, 98 нм с погрешностью $\pm 15\ldots 20\%$.

Покрытие НАнОкс в сравнении со стандартными покрытиями обладает более высокими антикоррозионными характеристиками. Это подтверждается измерениями защитной способности покрытий, приведенными в таблице. Защитная способность покрытий измеряли капельным методом (ГОСТ 9.308-78).

Аналогичные результаты получены при проведении ускоренных коррозионных испытаний в 3 % растворе NaCl (метод погружения).

Наноаноднооксидные покрытия не снижают усталостную прочность металла и обеспечивают высокую адгезию клеевых, лакокрасочных и теплозащитных покрытий. Важной особенностью разработанного электролита является его индифферентность к алюминию и к конструкционным

Защитная способность анодноокисных покрытий, сплав Д16 плакированный, температура испытаний 20 °C

Вид (шифр) покрытия	Напряжение, В	Время обработки, мин	Стойкость покрытия, мин
НАнОкс (УкрНИИТМ)	20	2	11.0
НАнОкс (УкрНИИТМ)	30	2	13.3
НАнОкс (УкрНИИТМ)	40	2	16.2
Ан.Окс.нв	20	30	10.5
Ан.Окс.нхр	20	30	12.5

онным сталим. Благодаря этому электролит, наряду с простыми деталями, позволяет:

- обрабатывать клепанные и сварные нахлесточные соединения, а также алюминиевые узлы со стальными деталями;
- совмещать антикоррозионную обработку изделий совместно с гидроиспытаниями (на стендах гидроиспытаний);
- проводить анодное окисление алюминиевых литых деталей, взамен стандартного токсичного хромовокислого анодирования.

Процесс наноанодирования не требует энерго затратных операций наполнения анодных пленок и снижает затраты на нейтрализацию отработанных сточных вод и электролитов. Для ракетного комплекса «Энергия» на стенде гидроиспытаний с использованием аналогичного электролита было успешно проведено внутреннее анодирование крупногабаритных баков емкостью более 2000 м³.

Сравнительно высокий уровень антикоррозионной защиты наноаноднооксидных покрытий является следствием их беспористой структуры и высокой химической стойкости Al₂O₃.

Режимы нанесения покрытий НАнОкс:

Да (начальное) = 2.5—3 А/дм²,

V = 40—45 В, t = 15—20 °C.

Время анодирования — 2.5—3 мин.

Внедрение процесса наноанодирования практически для всех алюминиевых сплавов позво-

лит в десятки раз сократить энергетические затраты и производственные мощности при одновременном улучшении экологической безопасности гальванических цехов.

Занинтересованным предприятиям ОАО УкрНИИТМ оказывает необходимую техническую помощь.

1. Голубев А. И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. — М.: Изд-во АН СССР, 1961.
2. Елинек Т. В. Успехи гальваниотехники // Гальваниотехника и обработка поверхности.—2007.—15, № 3.— С. 10—11.
3. Справочник химика. — М.: Изд-во «Химия», 1964.— Т. 3.—758 с.
4. Сухотин А. М. Справочник по электрохимии. — Л.: Изд-во «Химия», 1981.—309 с.

5. Thomas P., Benaben P. Nanostructures poreuses d'alumine: élaboration et propriétés // Galvano organo.—2005.— N 747.—S. 46—49.

NEW ENERGY SAVING METHOD OF NANOOXIDE PLATING FOR ALUMINIUM ALLOYS

A. B. Livshits, Yu. A. Don, P. N. Zheltov

A new energy saving method for nanooxide plating of aluminium alloys is developed. High anticorrosion resistance of nanooxide coverages (NanOks) is provided by their nonporosity. NAnOks plating method is universal and recommended for anticorrosive protection of articles made of D16, V95 AMG-6, Al8 and other alloys, for lap joints, aluminium units with steel components, glue-welding designs, etc. The application of nanoanodization allows one to reduce power inputs and production capacity by the factor of several tens as well as to increase environmental safety.

УДК 629.7.01:539.4

В. И. Сливинский, В. С. Зевако, Г. В. Ткаченко, О. А. Карпикова

БАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

Сотовые заполнители в конструкциях авиационно-космического назначения

Надійшла до редакції 14.07.08

Наведено функціональні, механічні та теплофізичні характеристики перспективних стільникових заповнювачів із алюмінієвої фольги, полімерного паперу «Nomex», скляної тканини та вуглецевих наповнювачів для стільникових конструкцій авіаційно-космічного призначення.

Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» — головная организация Национального космического агентства Украины по технологии машиностроения с 45-летним опытом работы в области технологического обеспечения машиностроительных, в том числе ракетно-космических производств, имеет в своем составе подразделение, занимающееся более 30 лет вопросами разработки технологии и изготовления сотового заполнителя (СЗ), его оптимизацией и изготовлением конструкций на их основе.

Главной особенностью сотовых конструкций является то, что она имеет момент инерции поперечного сечения, значительно больший, чем однослоиная. Вследствие увеличения момента инерции растет поперечная жесткость и повышается критическое напряжение общей потери устойчивости. При работе на поперечный изгиб сотовая конструкция выгодна благодаря увеличению момента сопротивления по сравнению с однослоиной. Таким образом, в сотовой конструкции разнесение несущих слоев на расстояние увеличивает ее устойчивость, жесткость и изгибающую прочность по сравнению с монолитной.

Кроме того, такие конструкции обладают хорошими теплопроводностью (соты из алюминиевой фольги), звуко- и теплоизолирующими

свойствами (соты на основе полимерной бумаги «Nomex» и стеклоткани); технологичны вследствие минимального количества деталей при сборке конструкции; имеют высокое аэродинамическое качество поверхности; отличаются высокой эксплуатационной надежностью, вибрационной прочностью [1].

Физико-механические характеристики (ФМХ), звуко-, теплоизолирующая и теплопередающая способность СЗ регулируются за счет изменения формы, размера ячейки, марки и толщины основы, высоты сотов. Сотовые заполнители — это семейство регулярных ячеистых конструкций, которые отличаются друг от друга по конфигурации ячейки, исходному материалу и методу изготовления. Размеры и форма ячеек СЗ определяется назначением конструкции и эксплуатационными нагрузками действующими на сотовые панели или оболочки.

Самый простой и распространенный тип сотов — заполнитель с шестиугранной формой ячейки. Он технологичен, обеспечивает высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики. Такая конфигурация применяется как для металлических, так и неметаллических сотов. Есть различные модификации шестиугранной формы ячейки [2]. Например, ячейка с мелким рифлением стенок повышает гибкость СЗ и обеспечивает развитие поверхности, склеивае-

мой с несущими слоями. Смещение гофрированных заготовок также повышает гибкость СЗ. Для повышения прочности и жесткости СЗ применяют усиливающие ленты или удлиняют двойную грань ячейки. Разновидностью СЗ с шестиугольной формой ячейки является заполнитель с прямоугольной формой, который изготавливается перетяжкой заготовок с шестиугольной ячейкой. Такой заполнитель легко выкладывается на цилиндрические поверхности. Заполнитель с гибкой формой ячейки «флекс» обладает способностью деформироваться, образуя сложные криволинейные поверхности. Заполнитель с цилиндрической формой ячейки имеет высокие удельные параметры прочности и жесткости, а с формой ячеек, имеющих перегибы и изломы, расположенные между участками соединения материала основы сотов, отличается повышенной гибкостью, которая необходима при изготовлении изделий сложной кривизны. Заполнитель с ромбической формой ячейки обладает минимальной массой за счет уменьшения длины сдвоенных стенок ячейки.

У перечисленных видов СЗ отношение сдвиговых механических характеристик вдоль линии соединения гофрированных заготовок и в перпендикулярном направлении имеет строго фиксированную величину. При оптимизации сотовой конструкции по массе возникает необходимость изменять эту величину. Применение СЗ в таких случаях с ячейкой в виде правильного шестиугольника приводит к увеличению массы сотовой конструкции. В целях создания оптимальных по массе сотовых конструкций авторами разработана обобщенная форма ячейки, которая за счет изменения значений геометрических и технологических параметров трансформируется в ячейки в виде ромба, квадрата, прямоугольника и др. с возможностью изменять ФМХ СЗ в нужном направлении [3].

Для изготовления СЗ применяют следующие основные способы:

- растяжение (расширение) — изготовление пакета из плоских листов соединенных в шахматном порядке с последующим растяжением;
- блочный — гофрирование и сборка-склейка гофрированных заготовок;
- объемное ткачество — отдельные элементы СЗ соединены между собой механическим переплетением волокон материала;

- экструдирование — может получаться как сотовая конструкция, так и отдельные ее элементы.

Метод изготовления СЗ растяжением пакетов считается одним из лучших. Он поддается механизации и автоматизации, и поэтому нашел широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности.

СЗ могут изготавливаться и из отдельных элементов с последующим их соединением.

В качестве материала основы СЗ может служить алюминиевая фольга, полимерная бумага, стеклоткань, углеродная, полимерные пленки и другие материалы [2].

В табл. 1 перечислены физические величины, которые будут использованы ниже для описания физико-механических характеристик различных материалов.

Сотовый заполнитель из алюминиевой фольги (АЛС) (табл. 2) — наиболее распространенный конструкционный материал, используемый в летательных аппаратах, работающих в различных условиях и воспринимающих постоянно действующие и знакопеременные нагрузки, в том числе акустические. Его основные особенности — высокая прочность и жесткость по отношению к весу [4], высокие теплопроводность и сопротивление усталости, хорошие антивибра-

Таблица 1. Обозначения физико-механических параметров

Параметр	Обозначение	Единицы измерения
Плотность	γ	кг/м ³
Предел прочности при сжатии	$\sigma_{\text{сж}}$	МПа
Предел прочности при сдвиге параллельно kleевым полосам	τ_{xz}	МПа
Предел прочности при сдвиге перпендикулярно к kleевым полосам	τ_{yz}	МПа
Модуль упругости при сдвиге параллельно kleевым полосам	G_{xz}	МПа
Модуль упругости при сдвиге перпендикулярно к kleевым полосам	G_{yz}	МПа
Удельная прочность	τ/γ	км
Удельный модуль упругости	G/γ	км
Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/(м·К)
Размер грани ячейки	d	мм
Содержание связующего	СС	%
Степень полимеризации	СП	%
Высота заполнителя	h	мм

Таблица 2. Физико-механические характеристики сотовых заполнителей на основе алюминиевой фольги (АЛС) и полимерной бумаги (ПСП)

№	Марка сотопласта	$\gamma, \text{ кг/м}^3$	$\sigma_{\text{сж}}$	τ_{xz}	τ_{yz}	G_{xz}	G_{yz}
АЛС (высота заполнителя $h = 18 \text{ мм}$)							
1	AMr2-H-2.5-30	44—57	1.2	1.0	0.73	200	120
2	5052-2.5-30	46—55	1.2	1.0	0.70	200	105
3	AMr2-H-2.5-40	60—75	2.4	1.35	0.93	230	135
4	AMr2-H-5.0-30	22—30	0.6	0.50	0.25	107	60
5	5052-5.0-30	23—28	0.58	0.44	0.25	91	55
6	AMr2-H-5.0-40	30—38	0.75	0.60	0.35	130	55
ПСП							
1	ПСП-1-1.85-48	48	1.4	1.0	0.7	35	20
	2.0—48						
	2.3—48						
	2.5—48						
2	ПСП-1-1.85-64	64	1.7	1.3	0.8	50	30
	2.0—64						
	2.3—64						
	2.5—64						
3	ПСП-1-1.85-96	96	5.0	1.9	1.4	70	40
	2.0—96						
	2.3—96						
	2.5—96						
4	ПСП-1-1.85-144	144	12.0	3.8	2.2	90	60
	2.0—144						
	2.3—144						
	2.5—144						
5	ПСП-1-1.85-200	200	14.0	4.5	2.9	120	80
	2.0—200						
	2.3—200						
	2.5—200						

Таблица 3. Физико-механические характеристики сотовых заполнителей на основе стеклоткани

Марка	$d, \text{ мм}$	$\gamma, \text{ кг/м}^3$	СС, %	СП, %	$h = 15 \text{ мм}$		$h = 10 \text{ мм}$			
					$\sigma_{\text{сж}}, \text{ МПа}$	$\tau_{xz}, \text{ МПа}$	$\tau_{yz}, \text{ МПа}$	$G_{xz}, \text{ МПа}$	$G_{yz}, \text{ МПа}$	
CCP-1ЭД	2.5	95—110	35—45	95—99	4.0	2.0	1.2	130	60	
	3.5	75—90			3.2	1.8	1.0	100	55	
	4.2	60—75			2.2	1.3	0.8	65	45	
	5.0	50—60			1.8	1.1	0.7	50	25	

ционные характеристики, негорючность, сохранение свойств при повышенной температуре, возможность обработки сложных поверхностей.

Из всей гаммы сотовых заполнителей представляет особый интерес полимерсотопласт (ПСП) — СЗ из полимерной бумаги, ФМХ которого также приведены в табл. 2 [5]. Конструкции на основе ПСП имеют ряд уникальных особенностей: легкость при высоком уровне ме-

ханических характеристик; способность сохранять эксплуатационные качества при перегрузках и локальных областях без необратимых повреждений, хорошие тепло-, звукоизоляционные характеристики. Такие свойства привели к широкому использованию материалов на основе полимерной бумаги для облегченных конструкций интерьеров и обитаемых космических станций, для теплошумоизоляции подобкатального

Таблица 4. Абсолютные и удельные физико-механические характеристики сотового заполнителя на основе углеродной ткани

Вид сотов	d , мм	γ , кг/м ³	$\sigma_{\text{СЖ}}$, МПа	τ_{xz} , МПа	τ_{yz} , МПа	$\sigma_{\text{СЖ}}/\gamma$, км	τ_{xz}/γ , км	τ_{yz}/γ , км	$G_{\text{рас}}$, МПа	G_{xz} , МПа	G_{yz} , МПа	$G_{\text{СЖ}}/\gamma$, км	G_{xz}/γ , км	G_{yz}/γ , км
УСП (ЭНФБ+ ЭЛУР-0.1П)	5.0	110	12.4	6.0	4.5	11.2	5.4	4.1	575	590	450	522	536	409
УСП (ЭНФБ+ ЛУ-П)	8.0	94	5.9	3.5	2.8	6.2	3.7	3.0	101	700	360	107	745	383

Таблица 5. Удельные физико-механические характеристики сотовых заполнителей из алюминиевой фольги, полимерсотовпластса и стеклосотовпластса

Nº	Марка сотовпластса	$\sigma_{\text{СЖ}}/\gamma$, км	τ_{xz}/γ , км	τ_{yz}/γ , км	G_{xz}/γ , км	G_{yz}/γ , км
Алюминиевая фольга						
1	AMr2-H-2.5-30	2.4	2.0	1.45	396.0	237.6
2	5052-2.5-30	2.4	2.0	1.39	396.0	207.9
3	AMr2-H-2.5-40	3.6	2.0	1.4	340.7	200.0
4	AMr2-H-5.0-30	2.31	1.9	1.0	411.5	230.8
5	5052-5.0-30	2.27	1.7	1.0	356.9	215.7
6	AMr2-H-5.0-40	2.2	1.8	1.0	382.4	161.8
Полимерсотовпласт						
1	ПСП-1-1.85-48 2.0-48 2.3-48 2.5-48	2.9	2.1	1.5	72.9	41.7
2	ПСП-1-1.85-64 2.0-64 2.3-64 2.5-64	2.7	2.0	1.3	78.1	46.9
3	ПСП-1-1.85-96 2.0-96 2.3-96 2.5-96	5.2	2.0	1.5	72.9	41.7
4	ПСП-1-1.85-144 2.0-144 2.3-144 2.5-144	8.3	2.6	1.5	62.5	41.7
5	ПСП-1-1.85-200 2.0-200 2.3-200 2.5-200	7.0	2.3	1.5	60.0	40.0
Стеклосотовпласт						
1	ССП-Іэд.-2.5	3.9	2.0	1.2	126.83	58.54
2	3.5	3.9	2.2	1.2	121.21	66.67
3	4.2	3.3	1.9	1.2	96.30	66.67
4	5.0	3.3	2.0	1.3	90.91	45.45

пространства головного обтекателя ракеты-носителя. Эти преимущества делают его конкурентоспособным, несмотря на высокую стоимость. СЗ на основе полимерной бумаги обладает высо-

кими показателями соотношения прочности и веса, имеет низкие плотности, коррозионностойкий, самозатухающий, имеет прекрасную усталостную прочность и ударопоглощение [6].

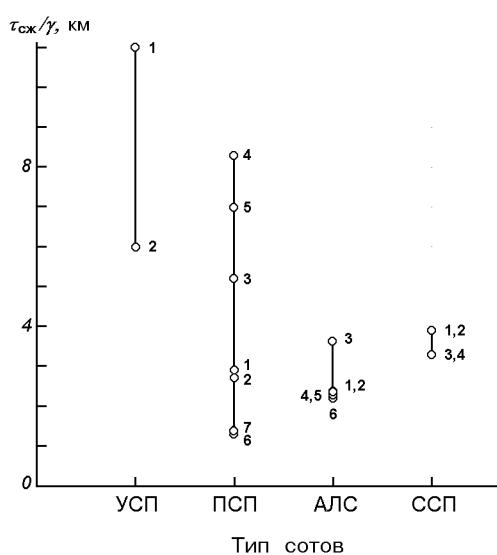


Рис. 1. Удельная прочность при сжатии различных сотов. Цифрами на рис. 1—3 обозначены разные марки сотовых заполнителей:

УСП: 1. УСП (ЭНФБ+ЭЛУР-0.1П)5.0
2. УСП (ЭНФБ+ЛУ-П)8.0
ПСП: 1. ПСП-1-1.85-48
2. ПСП-1-1.85-64
3. ПСП-1-1.85-96
4. ПСП-1-1.85-144
5. ПСП-1-1.85-200
6. ПСП-1-4.2-25
7. ПСП-1-3.5-35

АЛС: 1. АМг-Н-2.5-30
2. 5052-2.5-30
3. АМг-Н-2.5-40
4. АМг-Н-5.0-30
5. 5052-5.0-30
6. АМг-Н-5.0-40
ССП: 1. ССП-Іэд-2.5
2. ССП-Іэд-3.5
3. ССП-Іэд-4.2
4. ССП-Іэд-5

Стеклосотопласти (ССП) — это вид материалов, широко используемый в тех случаях, когда необходимо создать конструкции со специальными электрофизическими свойствами (например, для радиопрозрачных антенн радиолокаторов) или когда к изделию предъявляются требования по теплостойкости и низкой теплопроводности. Они прекрасно служат как матрицы для неструктурированных абляционных материалов. ССП обеспечивает при минимальной массе конструкции высокий коэффициент теплоизоляции. Эффективность тепловой защиты можно повысить заполнением сотовых ячеек специальными материалами. Физико-механические характеристики стеклосотопластов представлены в табл. 3 [7].

Углесотопласт (УСП) имеет максимальные абсолютные и удельные показатели прочности и

жесткости при сдвиге и сжатии (табл. 4) [8]. УСП обладает минимальным коэффициентом линейного расширения и в сочетании с углепластиковыми обшивками позволяет создать химически однородные размеростабильные конструкции. Однако к недостаткам следует отнести высокую стоимость и необходимость механической обработки даже для поверхностей малой кривизны из-за недостаточной его гибкости. Соты на основе углеродного наполнителя широко используются в трехслойных конструкциях в качестве заполнителя и элементов каркаса, поскольку позволяют значительно повысить прочность и жесткость конструкции, расширить ресурс работы изделий за счет создания однородных по химической природе элементов трехслойных сотовых конструкций.

Сравнение физико-механических показателей различных сотов удобно проводить по удельным прочностным характеристикам (табл. 4 и 5, рис. 1—3).

Анализ представленных данных показывает, что самые высокие удельные показатели прочности и жесткости при сдвиге и сжатии имеет УСП. ПСП находится на втором месте после УСП по удельным прочностным характеристикам и на последнем по удельным жесткостным характеристикам. Сотовый заполнитель из алюминиевой фольги находится на последнем месте по удельным прочностным характеристикам, и на втором — по жесткостным. ССП имеет характеристики по удельным показателям прочности при сдвиге и сжатии на уровне характеристик АЛС.

Помимо физико-механических характеристик, при эксплуатации СЗ необходимо учитывать их теплофизические свойства, в частности теплопроводность [9].

Нами были определены коэффициенты теплопроводности СЗ из различных материалов в составе трехслойной конструкции. Результаты испытаний образцов представлены в табл. 6. Как видно, наибольший коэффициент теплопроводности имеет заполнитель из АЛС, наименьший — заполнитель ПСП. Результаты испытаний показывают, что с увеличением размера стороны ячейки с 2.5 до 5.0 мм теплопроводность стеклосотопласта возрастает незначительно (на 7.0 %), заполнителя из АЛС снижается на 16.0 %.

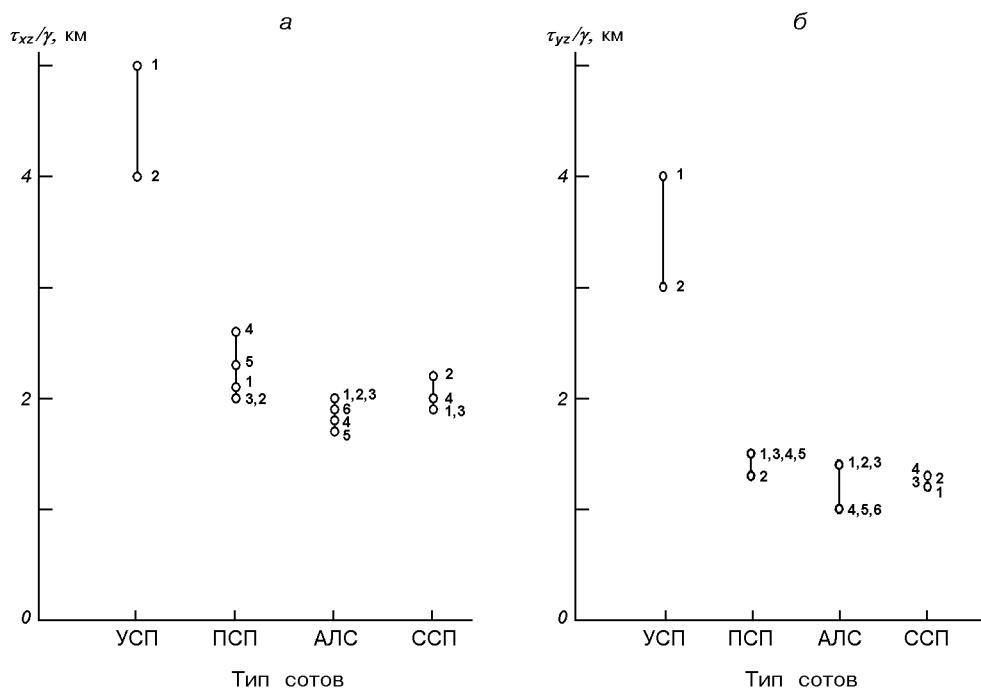


Рис. 2. Удельная прочность при сдвиге сотов из различных материалов: *а* — параллельно плоскости склейки; *б* — перпендикулярно к плоскости склейки

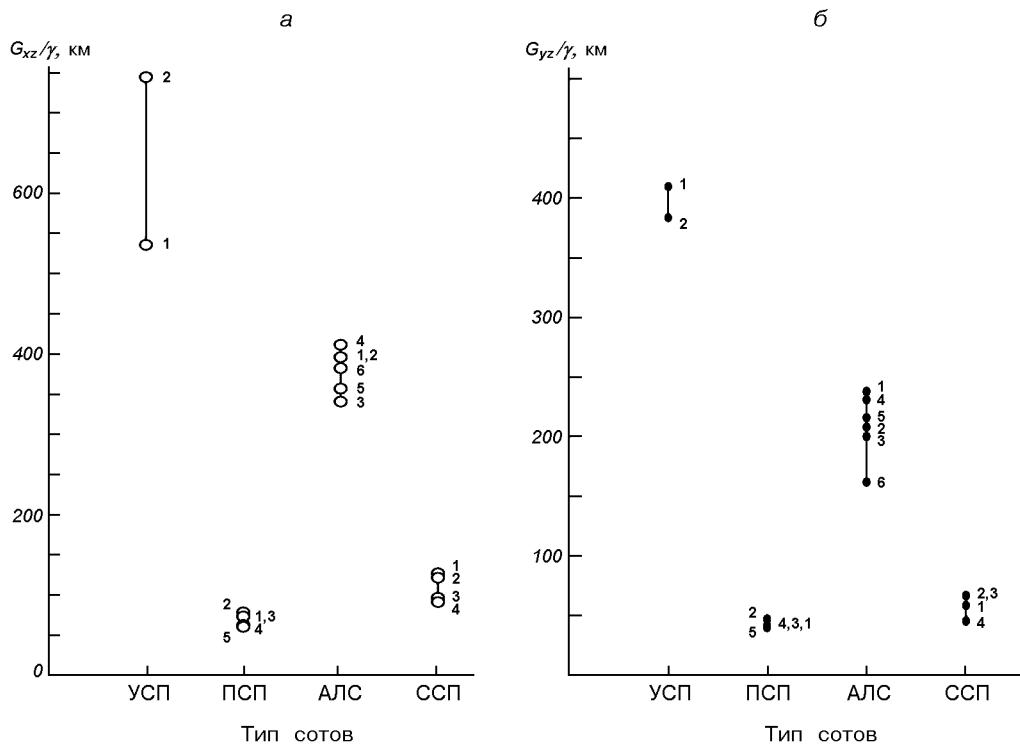


Рис. 3. Удельный модуль упругости при сдвиге различных сотов: *а* — параллельно плоскости склейки; *б* — перпендикулярно к плоскости склейки

Таблица 6. Коэффициенты теплопроводности сотовых заполнителей

Марка сотопласта	<i>d</i> , мм	<i>h</i> , мм	Толщина трехслойного образца, мм	γ , кг/м ³	λ , Вт/(м·град)
Углесотопласт (УСП)	5.0	17.2	19.8	110.0	0.327
Стеклосотопласт (ССП) (толщина стеклоткани 33-100 σ =100 мкм)	2.5	17.0	14.5	55.2	0.105
Полимерсотопласт (ПСП) (бумага БФСК толщиной σ = 50 мкм)	5.0	12.5	10.0	81.0	0.112
Заполнитель из фольги АМг2-Н (АЛС) (толщина фольги σ = 30 мкм)	3.5	12.5	10.0	37.2	0.085
	2.5	17.2	15.0	58.3	0.610
	5.0	17.2	15.0	27.6	0.523

Таким образом, использование того или иного сотового заполнителя для сотовых конструкций авиационно-космического назначения определяется назначением, эксплуатационными, физико-механическими и теплофизическими характеристиками изделия.

Для обеспечения предприятий РКТ и авиации в ОАО УкрНИИТМ создано единственное на Украине производство СЗ из различных материалов. Производится более 60 типоразмеров СЗ. В настоящее время освоено изготовление СЗ шестигранной формой ячейки на основе алюминиевой фольги толщиной от 20 до 50 мкм из сплавов марок АМг2-Н, 5052, 5056. По желанию заказчика для СЗ из алюминиевой фольги могут быть различные комбинации марок фольги, ее толщины и размеров ячеек. СЗ из фольги поставляются в виде сотопакетов размером 860×400 мм с количеством слоев от 250 до 750. СЗ из стеклоткани выпускаются в виде панелей размером 300×1000 мм×*h*. СЗ из полимерной бумаги выпускаются в виде панелей размером 340×1000 мм×*h*. СЗ из крафт-бумаги поставляются в виде долек заданной высоты, длиной 700 мм с количеством от 200 до 500.

Испытательная база предприятия обеспечивает определение всего комплекса необходимых физико-механических характеристик СЗ. При необходимости ОАО УкрНИИТМ оказывает помощь в выборе СЗ, выполнении расчета и создания трехслойных сотовых конструкций с учетом заданных физико-механических характеристик.

1. Берсуский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. М. Производство сотовых конструкций. — М.: Машиностроение, 1975.—296 с.
2. Гладков Ю. А., Панин В. Ф. Конструкции с заполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
3. Исследование и разработка технических решений по созданию прогрессивной технологии и оборудования для изготовления сотов: (Отчет) / УкрНИИТМ. — Днепропетровск, 1990.—269 с.
4. ОСТ 92-4495-84. Заполнители сотовые на основе стеклоткани.
5. Сливинский В. И. Конструктивно-технологические решения и технология производства сотов с регулируемыми механическими характеристиками и сотовых конструкций для летательных аппаратов: Дис ... канд. тех. наук. — Харьков, 1992.—341 с.—Машинопись.
6. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера и др. — М.: Машиностроение, 1988.—Кн. 2.—584 с.
7. ТУ 92-923-2-69-82. Панели углесотопластиковые марки УСП.
8. ТУ 1-596-231-01. Полимерсотопласти (ПСП).
9. ТУ14311577.237-02. Заполнители сотовые клеенные из алюминиевой фольги.

HOONEYCOMB CORES FOR HONEYCOMB STRUCTURES OF AEROSPACE ASSIGNMENT

*V. I. Slyvyn's'kyj, V. S. Zevako, G. V. Tkachenko,
O. A Karpijkova*

The paper describes functional, mechanical, and thermal-physical characteristics of honeycomb cores made of aluminum foil, Nomex polymeric paper, glass cloth and carbon fillers, which are considered promising for honeycomb structures of aerospace assignment.

НАШІ АВТОРИ

АЛЕКСЄЄВ Євген Михайлович — провідний інженер-технолог Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», нагрудний знак «Ветеран космічної галузі України». Напрям науки — технологія машинобудування

БЕРЕЗОВСЬКИЙ Вадим Якимович — завідувач відділу клінічної патофізіології інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, доктор медичних наук, професор, видатний патофізіолог, лауреат Державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України, куратор напрямку «Космічна медицина» Національного космічного агентства України.

Напрям науки — клінічна фізіологія та космічна медицина.

БЄЛОВ Дмитро Георгійович — начальник лабораторії Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, доцент, заслужений машинобудівник України.

Напрям науки — космічна електроенергетика та автоматика.

ВОЛКОВ Вікентій Павлович — провідний спеціаліст ДП «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова».

Напрям науки — машинобудування.

ГОРНОСТАЄВ Геннадій Федорович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук. Нагороджений медаллю ім. Ю. В. Кондратюка.

Напрям науки — розробка волоконно-оптических вимірювальних систем.

ДОНЕЦЬ В. В. — КП Центральне конструкторське бюро «Arsenal».

ДОН Юрій Олександрович — інженер-технолог III категорії Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування».

Напрям науки — технологія машинобудування.

ЄФІМЧУК Борис Павлович — провідний науковий співробітник Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», кандидат технічних наук, Ветеран космічної галузі України, Заслужений випробувач космічної техніки. Нагороджений медаллю «За трудову відзнаку», медаллю ім. М. К. Янгеля Федерації космонавтики

Напрям науки — технологія машинобудування.

ЖЕЛТОВ Павло Миколайович — перший заступник голови правління з наукової роботи Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», заступник голови координаційної ради з матеріалів та технологій Національного космічного агентства України, Заслужений машинобудівник України, Заслужений творець космічної техніки Росії, член-кореспондент Російської академії космонавтики, Почесний працівник космічної галузі України. Нагороджений орденом «Знак Пошани», медалями ім. Ю. О. Гагаріна та Ю. В. Кондратюка.

Напрям науки — технологія машинобудування.

ЖИТОМИРСЬКА Ксенія Геннадіївна — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — інтелектуальні методи обробки даних, інформаційні технології.

ЗЕВАКО Василь Сергійович — голова правління (директор) Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», кандидат технічних наук, доцент.

Напрям науки — технологія машинобудування.

КАЗАНЦЕВ Т. А. -- науковий співробітник Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України.
Напрям науки — фізіологія рослин.

КАРПІКОВА Оксана Олександровна — інженер-технолог I кат. Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування».

Напрям науки — машинобудування, стільникові конструкції.

КОСТЮЧЕНКО Олександр Сергійович — аспірант відділу клінічної патофізіології ім. О. О. Богомольця НАН України.

Напрям науки — фізіологічна регенерація кісткової тканини.

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

КУССУЛЬ Наталія Миколаївна — завідувач відділу інформаційних технологій та систем, Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — інтелектуальні обчислення, методи обробки супутниковых даних, інформаційні технології.

ЛІВШИЦЬ Абрам Борисович — головний науковий співробітник Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», кандидат технічних наук, Заслужений машинобудівник України, Ветеран космічної галузі України. Нагороджений медаллю «За доблесний труд», медаллю Федерації космонавтики Росії ім. академіка С. П. Корольова, а також Почесною грамотою Міністерства загального машинобудування і Центрального комітету профсоюзів СРСР, Почесною грамотою Президента України.

Напрям науки — технологія машинобудування.

ЛІТОВКА Ірина Георгіївна — провідний науковий співробітник відділу клінічної патофізіології інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, доктор біологічних наук.

Напрям науки — фізіологічна регенерація кісткової тканини та її метаболізм.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, Лауреат премії імені В. І. Вернадського, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — гідрогеологія, дистанційне зондування земної поверхні.

МІШРА Раджеш Кумар — Інститут досліджень тропічних лісів, Джабалпур, Індія.

МІШРА Реха Агарвал — Урядовий автономний коледж наукового моделювання, Джабалпур, Індія.

ПАРНОВСЬКИЙ Олексій Сергійович — завідувач лабораторії аналітичних досліджень та інформаційного забезпечення Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — магнітна гідродинаміка, матеріалознавство, дистанційні аерокосмічні дослідження, статистика, чисельні методи.

ПОГОРЄЛОВ Олександр Анатолійович — начальник науково-дослідного відділу неруйнівних методів контролю Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», кандидат технічних наук.

Напрям науки — технологія машинобудування.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геолого-мінералогічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — енергомасообмін в геосистемах.

СЕМЕНОВ Лев Петрович — начальник відділу Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічні технології, космічне матеріалознавство.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна — молодший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — програмування для вирішення задач енергомасообміну в геосистемах та обробки супутникових даних.

СКАКУН Сергій Васильович — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — інтелектуальні методи обробки даних, інформаційні технології.

СЛИВИНСЬКИЙ Володимир Іванович — головний науковий співробітник Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», доктор технічних наук.

Напрям науки — машинобудування, стільникові конструкції.

ТКАЧЕНКО Галина Валентинівна — начальник відділу технології стільниківих конструкцій Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування».

Напрям науки — машинобудування, стільниківі конструкції.

ХВОСТОВ Михайло Миколайович — начальник науково-дослідного відділу Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування». Відзнаки — медаль імені М. К. Янгеля Федерації космонавтики, Почесна грамота Національного космічного агентства України.

Напрям науки — технологія машинобудування.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, лауреат Премії МВССО СРСР, лауреат Премій Ради Міністрів СРСР.

Напрям науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погода.

ШАМОТА Марія Олександрівна — випускниця радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, бакалавр прикладної фізики, магістр з радіофізики і електроніки, лауреат премії «Найкращий молодий науковець Харківщини».

Напрям науки — геофізика, дослідження геокосмосу, варіації геомагнітного поля.

ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук, докторант.

Напрям науки — інтелектуальні обчислення, моделювання та розробка розподілених систем, інформаційні технології.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна — старший науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — енергомасообмін в геосистемах.

ЯНКО Роман Васильович — аспірант відділу клінічної патофізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України.

Напрям науки — клітинна морфометрія.