

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 11, № 1/2, 2005

KYIV

ЗМІСТ

Гусинин В. П., Гольдштейн Ю. М., Дорошкевич В. К.,
Кузнецов В. И., Кучугурный Ю. П. Многокритеріальний
сравнительный анализ объектов ракетно-космической техники

Шатихін В. Є., Семенов Л. П., Артеменко Ю. Г., Ігнатович
С. Р. Вплив вуглепластикових фермових конструкцій соняч-
них батарей на динамічні характеристики механізму їхнього
приводу

Сердюк І. І., Хлистун А. І., Хаврошін В. Ф. Модели-
рование температурных условий в зоне размещения ракеты
космического назначения на борту самолета-носителя Ан-
124-100

Урус'кий О. С., Зубко В. П., Мотижев С. В., Стефанішин
Я. І. Міжнародна космічна радіотехнічна система КОСПАС-
SARSAT

CONTENTS

- 3 *Gusynin V. P., Goldshtein Yu. M., Doroshkevich V. K., Kuznetsov V. I., Kuchugurny Yu. P. Multicriterial comparative analysis of rocket and space technology*
- 10 *Shatikhin V. Ye., Semenov L. P., Artemenko Yu. H., Ihnatovich S. R. The effect of carbon plastic truss structures of solar arrays on dynamical characteristics of their drive mechanism*
- 16 *Serdruk I. I., Khlystun O. I., Khavroshyn V. F. Temperature conditions simulation in space vehicle place aboard An-124-100 aircraft*
- 22 *Uruskyi O. S., Zubko V. P., Motyzhev S. V., Stefanishyn Ya. I. The international space radiotechnical system COSPAS-SARSAT*

<i>Стоділка М. І.</i> Дослідження п'ятихвилинних коливань яскравості Сонця: експеримент ДИФОС-Ф	30	<i>Stodilka M. I.</i> Investigation of the five-minute solar brightness oscillations: DIFOS-F experiment
<i>Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф.</i> Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды	37	<i>Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F.</i> Observation data on wave-like processes in ionosphere under quiet and disturbed conditions
<i>Мартыш Е. В., Радченко О. М., Сидоренко В. С., Яценко В. О.</i> Акустична діагностика гетерофазної плазми	68	<i>Martysh Ye. V., Radchenko O. M., Sidorenko V. S., Yatsenko V. A.</i> Acoustic diagnostics of heterophase plasma
<i>Клименко Ю. А., Кременецкий И. А., Черемных О. К.</i> Тензор диэлектрической проницаемости ионосферной пылевой плазмы	73	<i>Klymenko Yu. O., Kremenetskyy I. A., Cheremnykh O. K.</i> The dielectric permittivity tensor of ionospheric dusty plasma
<i>Кришталь А. Н., Герасименко С. В.</i> Неустойчивость высокочастотных ленгмюровских волн в предвспышечной плазме	68	<i>Kryshnal A. N., Gerasimenko S. V.</i> High-frequency Langmuir wave instability in preflare plasma
<i>Кордюм Е. Л.</i> Перспективи розвитку космічної біології та медицини у світі та в Україні	75	<i>Kordyum E. L.</i> Prospects of space life sciences in the world and Ukraine
<i>Міщенко Л. Т., Остапченко Л. І., Філенко О. М.</i> Вплив клиностатування на стійкість пшениці до вірусної інфекції	87	<i>Mishchenko L. T., Ostapchenko L. I., Filenko O. M.</i> Effects of clinorotation on wheat's resistance to viral infection
<i>Березовський В. Я., Літовка І. Г., Костюченко О. С.</i> Дозовані біофізичні впливи стабілізують маркери ремоделювання кісткової тканини при остеопенії розвантаження	93	<i>Berezovskii V. A., Litovka I. G., Kostyuchenko A. S.</i> Dozed biophysical influences stabilize the bone remodeling markers after unloaded induced osteopenia
<i>Борисова Т. А., Позднякова Н. Г., Крысанова Н. В., Гиммелрейх Н. Г.</i> ГАМК и глутамат: экзоцитоз и Na^+ -зависимое освобождение из нервных окончаний головного мозга в экстремальных условиях	98	<i>Borisova T. A., Pozdnyakova N. G., Krisanova N. B., Himmelreich N. G.</i> GABA and glutamate: Exocytosis and Na^+ -dependent release from the rat brain nerve terminals under extremal conditions
НАІШІ АВТОРИ	103	OUR AUTHORS

УДК 519.9:629.764

В. П. Гусинин¹, Ю. М. Гольдштейн², В. К. Дорошкевич²,
В. И. Кузнецов², Ю. П. Кучугурный²

¹Національне космічне агентство України, Київ

²Інститут технічної механіки НАН України і НКА України, Дніпропетровськ

Многокритериальный сравнительный анализ объектов ракетно-космической техники

Надійшла до редакції 15.07.04

Проблема порівняльного аналізу об'єктів ракетно-космічної техніки сформульована в термінах однієї з фундаментальних задач системного аналізу — порівняння об'єктів по сукупності різномірних критеріїв. Пропонується алгоритмізована методика порівняльної оцінки, яка базується на методі аналізу ієархій. Наведено приклад — порівняння груп ракет-носіїв, отриманий з використанням розробленого програмного забезпечення.

Предметом нашей статьи является сравнение различных объектов ракетно-космической техники (РКТ) одинакового назначения — ракет-носителей (РН), космических ракетных комплексов (КРК), космических аппаратов (КА), платформ и так далее. Их разработка и эксплуатация требует выделения значительных ресурсов, поэтому сравнительный анализ объектов РКТ проводится практически на всех этапах их создания и эксплуатации: при выборе направлений модернизации и при проектировании — для определения технического уровня проектируемого объекта, при продвижении на рынок — для оценки конкурентоспособности и выборе рыночной стратегии. Несомненно, разработка эффективной методики такого анализа весьма актуальна. Сложность задачи заключается в том, что объекты РКТ необходимо сопоставлять по большому числу количественных и качественных (оцениваемых экспертно) критериальных признаков, и стандартной является ситуация, когда ни один из объектов не доминирует по всем показателям одновременно.

Уточним используемые определения. Критериальный признак — количественная или качественная характеристика, существенная для суждения об объекте. Показатель — количественное значение или качественная оценка оцениваемого объекта по

определенному критериальному признаку. Можно сказать, что система критериальных признаков — это система координат в многомерном пространстве, в котором анализируются объекты, а набор показателей объекта — это точка или область, занимаемая объектом в пространстве критериальных признаков.

Такой подход к анализу объектов авиации и других транспортных систем впервые был предложен в 1930-е годы Р. Л. Бартини («параллелепипед Бартини»). В 1970—1980-е гг. Т. Л. Саати разработал и развил «иерархический аналитический процесс» (*analytic hierarchy process*) — мощный метод сопоставительного анализа и ранжирования объектов, характеризующихся наборами критерий и показателей, количественных и качественных. Этот метод называют также методом анализа иерархий (МАИ) [8, 10, 11].

Этот метод для успешного применения требует соблюдения следующих условий:

а) в процедуре принимают участие достаточно квалифицированные эксперты, не допускающие существенных погрешностей в оценках, более того, в рамках метода МАИ требуется, чтобы группа экспертов была консолидированной, т. е. имеющей общие позиции и стремящейся к согласованности своих оценок;

б) для множества сравниваемых объектов («альтернатив») может быть выстроена общая система критериев;

в) оценки по «негативным» критериям не находятся в опасной близости к ограничениям.

Как показывает опыт, в области ракетно-космической техники эти условия вполне можно выполнить.

Отметим, что ни один из многокритериальных методов не свободен от недостатков [7]. Возможно, это фундаментальное свойство проблемы, и поэтому методов так много.

Сформулируем основные требования к методике сравнительного анализа объектов РКТ.

1. Открытость и гибкость — могут использоваться различные системы критерисв, как количественных, так и качественных.

2. Достаточная универсальность — возможность сравнивать и ранжировать любые объекты, для которых можно построить общую систему критериев.

3. Обозримость и оперативность — все необходимые расчеты и экспертные оценки по методике могут выполняться одним экспертом или небольшой группой в приемлемые сроки.

4. Максимально возможная объективность — экспертам и лицам, принимающим решения, должна быть предоставлена возможность проверки обоснованности и согласованности суждений. Отметим, что при наличии экспертных оценок субъективность нельзя устранить полностью [3—5].

Сравнение объектов по совокупности разнородных критериев является одной из фундаментальных задач системного анализа. Разработано много методов многокритериального сравнения [4—6, 9]. В различных прикладных задачах целесообразно использовать различные методы. Проведенный анализ показал, что сформулированным требованиям наиболее соответствует метод анализа иерархий [8, 10, 11]. Подход, основанный на этом методе, позволил отделить разработку общей методики (универсальной) от формирования набора критериев (специфических для рассматриваемой задачи), разработать алгоритмизированную и удовлетворяющую всем перечисленным требованиям методику. Методика реализована в виде программного пакета и используется в системных исследованиях ракетно-космической техники.

Сущность метода анализа иерархий состоит 1) в представлении исходной проблемы в виде иерархии; 2) в вынесении экспертных суждений на каждом уровне иерархии по парным сравнениям с использованием особой числовой шкалы, что позволяет сравнивать как количественные, так и качественные показатели; 3) в специальной математической обработке суждений.

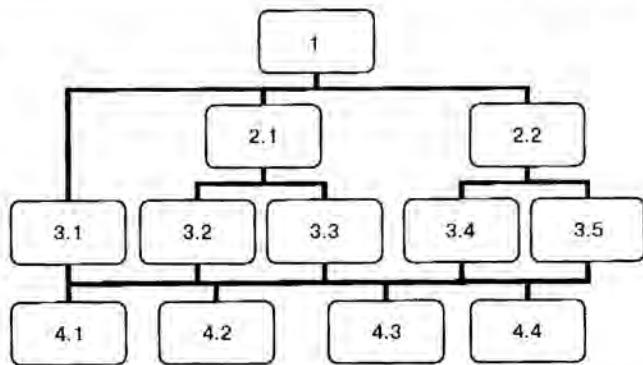


Рис. 1. Схема четырехуровневой доминантной иерархии: 1 — цель, 2 — групповые критерии, 3 — критерии, 4 — альтернативы

венные показатели; 3) в специальной математической обработке суждений.

Рассмотрим этапы применения метода при сравнительном анализе объектов РКТ.

1. Как показывает опыт, в задаче сравнительного анализа объектов РКТ можно ограничиться доминантными трехуровневыми или четырехуровневыми иерархиями (рис. 1).

Четырехуровневые иерархии целесообразно использовать при большом числе критериев (более 7—10): критерии объединяются в группы критериев, вводится дополнительный уровень иерархии — групповые или комплексные критерии. Доминантные иерархии имеют древовидную структуру с одной вершиной — «целью» иерархии. Цель составляет высший уровень иерархии (уровень 1). На этом уровне может находиться лишь один объект. На следующем «вниз» уровне 2 в трехуровневой иерархии находятся критерии, а в четырехуровневой иерархии — комплексные критерии. По системе этих критериев оцениваются сравниваемые объекты (альтернативы). Альтернативы располагаются на самом нижнем уровне.

2. В методе анализа иерархий первичной операцией является парное сравнение: два объекта, находящихся на одном уровне, сравниваются по своей относительной значимости для одного объекта вышестоящего уровня. Если критерий имеет определенную числовую меру, например масса выводимого полезного груза или стоимость, то в качестве результата оценки удобно (но не обязательно) взять отношения соответствующих характеристик (заданных либо рассчитанных). Если критерий не имеет принятой меры, то сравнение в МАИ проводится с использованием специальной «шкалы относительной важности» (шкала 1—9). Эта шкала

имеет следующие основные уровни, выбранные с учетом экспериментально установленных психофизиологических особенностей человека, проводящего сравнение [8]:

- 1 — нет превосходства одного объекта над другим,
- 3 — слабое превосходство,
- 5 — сильное превосходство,
- 7 — очень сильное превосходство,
- 9 — абсолютное превосходство.

Четные уровни шкалы (2, 4, ...) — промежуточные [8].

Остановимся на парном сравнении более подробно. Пусть на рассматриваемом иерархическом уровне находится n объектов, а на более высоком уровне — m объектов. Предположим, что все n объектов могут быть объективно оценены по их влиянию на каждый из m объектов более высокого иерархического уровня; нормированные на единицу, эти оценки w_i (заранее неизвестные) будут иметь вид

$$w_1, w_2, \dots, w_n,$$

$$0 < w_i < 1, \quad \sum w_i = 1.$$

Существенно, что в МАИ ценность элемента может быть малой, но не нулевой. Составим из этих оценок матрицу парных сравнений A , элементы которой $a_{ij} = w_i / w_j$ определяют, во сколько раз i -й элемент (стоящий в строке) более важен, чем j -й элемент (в столбце) по влиянию на рассматриваемый элемент-критерий более высокого уровня. Матрица A квадратная ($n \times n$), с положительными элементами. Очевидно, что все элементы на главной диагонали матрицы — полученные при сравнении элемента с самим собой — единичные ($a_{ii} = 1$). Результаты сравнения i -элемента с j -элементом и j -элемента с i -элементом — взаимно обратные числа — матрица A обратно симметрична: $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Из этих двух операций сравнения выполняется только одна: если элемент матрицы a_{ij} оценен, то симметричный относительно главной диагонали матрицы элемент вычисляется.

При условии известных истинных весов матрица парных сравнений принимает вид

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

В большинстве случаев веса неизвестны. В этих случаях оценки проводятся экспертом, при этом

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

где a_{ij} — экспертная оценка i -го объекта по сравнению с j -м объектом по шкале «1—9».

Для данного иерархического уровня конструируют m матриц парных сравнений — по каждому элементу лежащему выше уровня; таким образом всего проводится $m(n-1)/2$ парных сравнений.

Если в работе участвуют S равноправных экспертов, и их мнения существенно расходятся, то в качестве оценки рекомендуется использовать среднее геометрическое оценок экспертов [8]:

$$a_{ij} = \left(a_{ij}^{(1)} \cdot a_{ij}^{(2)} \cdot \dots \cdot a_{ij}^{(S)} \right)^{1/S}.$$

При необходимости могут быть учтены и различия в компетентности или ранге экспертов.

3. На третьем этапе производится математическая обработка матриц парных сравнений по всей иерархической структуре:

- исходя из матриц парных сравнений, определяются локальные приоритеты для каждой матрицы;
- для элементов каждого иерархического уровня вычисляются синтезированные приоритеты;
- вычисляются глобальные приоритеты альтернатив по совокупности критериев.

Совокупности приоритетов каждого типа образуют векторы приоритетов. Под приоритетами понимаются положительные числа. Сумма компонентов вектора приоритетов равна 1.

Определение приоритетов позволяет линейно упорядочить (ранжировать) объекты, первоначально рассматриваемые как точки многомерного пространства критериев. Приоритеты позволяют количественно оценить сравнительную ценность объектов по выбранной системе критериев.

Рассмотрим детальное процесс определения вектора локальных приоритетов по известной матрице парных сравнений.

Пусть X -мерный вектор составлен из искомых приоритетов x_i :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad 0 < x_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1.$$

Если бы «истинные значения» w_i оценок объектов были известны, то можно было бы записать $x_i = w_i / w$, где $w = \sum w_i$.

Умножим вектор X на матрицу сравнений A слева:

$$(A \cdot X)_i = \sum_j a_{ij} x_j = \sum_j \frac{w_i}{w_j} x_j = w_i \sum_j \frac{x_j}{w_j} = \frac{w_i}{w} \sum_j \frac{w_j}{w_j}.$$

Поскольку

$$\sum_i (w_i/w_j) = \sum_i 1 = n,$$

то подстановка «истинных значений» в это выражение дает

$$A \cdot X = nX.$$

Следовательно, задача определения вектора локальных приоритетов сводится к задаче о нахождении собственного вектора матрицы парных сравнений:

$$A \cdot X = \lambda X$$

и последующей нормировки этого вектора:

$$\sum x_i = 1.$$

Задача о нахождении собственных векторов и собственных значений матрицы имеет несколько решений — спектр матрицы $\{\lambda_k, X_k\}$. В рассматриваемой задаче искомым является вектор, который соответствует максимальному собственному значению. По теореме Перрона [2] максимальное по абсолютной величине собственное значение положительной квадратной матрицы единственно и положительно, и соответствующий ему собственный вектор — положителен. Кроме того, максимальное собственное значение положительной обратно симметричной матрицы не меньше ее ранга: $\lambda_{\max} \geq n$. Эти свойства матриц сравнений позволяют использовать в программе известные вычислительные методы [1] для определения максимального собственного значения и собственного вектора матрицы, являющегося вектором приоритетов. (В состав практических математических пакетов включены средства для нахождения собственных значений и векторов матриц — Eigenvalues, Eigenvectors).

Для решения рассматриваемых задач можно применять как общие, так и специализированные методы. В разработанной программе применяется следующий итерационный метод. В качестве начального приближения берется любой вектор X соответствующей размерности n . В общем случае его можно разложить по собственным векторам X_i рассматриваемой матрицы:

$$X = \sum_i \alpha_i X_i$$

Поскольку $A X_i = \lambda_i X_i$, в результате P -кратного

действия матрицы A на вектор X имеем

$$\begin{aligned} A^P X &= A^{P-1} \sum_i \alpha_i A X_i = \\ &= A^{P-1} \sum_i \alpha_i \lambda_i X_i = \sum_i \alpha_i \lambda_i^P X_i. \end{aligned}$$

Учитывая, что одно из собственных значений (λ_1) максимальное и положительное, получаем, что коэффициент разложения у вектора X_1 в последней формуле при достаточно большом числе итераций становится существенно больше, чем остальные коэффициенты. Следовательно, вектор $A^P X$ становится «почти коллинеарным» искомому вектору X_1 . В результате нормировки вектора $A^P X$ получаем искомый вектор приоритетов:

$$X_1 = \frac{A^P X}{\sum_i (A^P X)_i}.$$

Максимальное собственное значение вычисляется как коэффициент пропорциональности между компонентами вектора:

$$\lambda_1 = \frac{(AX_1)_i}{(X_1)_i}.$$

Для контроля согласованности экспертных оценок вводятся две связанные характеристики — индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС [8]:

$$IS = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad OC = \frac{IS}{P_n},$$

где P_n — индекс согласованности для положительной обратно симметричной матрицы случайных оценок размера $n \times n$; элементы этой матрицы получены случайным выбором из множества допустимых оценок, т. е. из чисел ряда $\{1/9, 1/8, 1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$.

Значения P_n приведены ниже [8]:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_n	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Допустимым считается отношение согласованности, не превышающее 10—20 %. Если ОС выходит из этих пределов, то экспертам необходимо исследовать задачу и проверить свои оценки [8].

Вычисление синтезированных приоритетов для каждого уровня иерархии производится следующим образом.

Уровень иерархии характеризуется: номером уровня p ; числом элементов уровня n_p ; набором матриц парных сравнений по критериям-элементам предыдущего уровня $p - 1$: $\{A_1, A_2, \dots, A_{n_{p-1}}\}$; матриц, столько же, сколько элементов предыдущего уровня — n_{p-1} , а размерность матриц равна числу n_p сравниваемых элементов; набором векторов локальных приоритетов, полученных из матриц сравнения:

$$(X_1, X_2, \dots, X_{n_{p-1}})^{(p)} = \left(\begin{pmatrix} x_1^{(1)} \\ \dots \\ x_{n_p}^{(1)} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_1^{(2)} \\ \dots \\ x_{n_p}^{(2)} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} x_1^{(n_{p-1})} \\ \dots \\ x_{n_p}^{(n_{p-1})} \end{pmatrix} \right)^{(p)}$$

всего на p -уровне n_{p-1} векторов размерности n_p . Обозначим через $y_i^{(p)}$ синтезированный (вычисленный) приоритет уровня p . Вычисление (синтез) приоритетов производится следующим образом. Самый верхний элемент иерархии — цель — имеет приоритет $y_1^{(1)} = 1$. Приоритеты нижнего уровня с номером $p > 1$ вычисляют, используя приоритеты для уровня $p - 1$ в качестве весовых множителей. Процесс идет до нижнего уровня иерархии, где находятся альтернативы:

$$y_i^{(p)} = \sum_{k=1}^{n_{p-1}} (x_i^{(p)})_k \cdot y_k^{(p-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p.$$

Каждый элемент на иерархическом уровне характеризуется единственным приоритетом $y_i^{(p)}$. Уровни характеризуются разным числом приоритетов, по числу элементов на уровне. Приоритеты каждого уровня образуют n_p -мерный нормированный вектор (заметим, что размерность векторов различна на разных уровнях):

$$Y^{(p)} = \begin{pmatrix} y_1^{(p)} \\ \dots \\ y_{n_p}^{(p)} \end{pmatrix}, \quad \sum_{i=1}^{n_p} y_i^{(p)} = 1.$$

Вычисленные приоритеты всех уровней, т. е. нормированные векторы $\{Y^{(1)}, \dots, Y^{(n_{p-1})}\}$, представляют собой математическое решение поставленной задачи.

Вектор приоритетов уровня критерий показывает направления совершенствования объекта, отображая важность каждого из свойств или параметров («что важно и чего недостает объекту в сравнении с другими»). Вектор приоритетов уровня альтернатив позволяет произвести ранжирование объектов: каждому из них соответствует свой приоритет (составляющая вектора) — число в интервале (0 — 1). Чем это число больше, тем объект предпочтительнее. Вектор приоритетов уровня альтернатив дает числовую характеристику для каждого возможного варианта выбора, его можно использовать в качестве критерия обобщенной ценности в задачах распределения ресурсов. Если в состав альтернатив включить лучшие из известных объектов данной отрасли техники, то, вычислив приоритеты, можно определить уровень предлагаемых технических проектов.

Разработанная методика и программное обеспечение использовались в задачах анализа объектов РКТ. Для примера рассмотрим трехуровневую иерархию, и на основе данных из общедоступных источников (Space News, Новости космонавтики, проспекты фирм и др.) сопоставим три семейства перспективных ракет-носителей.

Построим схему иерархии для сравнения технико-экономического уровня (рис. 2).

Цель: сравнение технико-экономического уровня трех новых зарубежных семейств ракет-носителей «Ариан-5», «Атлас-5» и «Дельта-4» для запусков тяжелых геостационарных КА.

Для оценки используются шесть критериальных признаков.

1. Энергетические возможности — максимальная масса полезного груза, выводимого на геопереходную орбиту.



Рис. 2 Схема иерархии для сравнения технико-экономического уровня ракет-носителей

Таблица 1. Матрица сравнений и приоритеты критериальных признаков по отношению к цели ($n = 6$, $\lambda = 7.0490$, ИС = 0.2098, ОС = 0.1692)

Признак	1	2	3	4	5	6	Приоритет
1 Энергетические возможности	1	3	1/5	1/2	3	5	0.1918
2 Гибкость	1/3	1	1/5	1/3	1	1/7	0.0463
3 Адаптируемость	5	5	1	2	3	3	0.3609
4 Надежность	2	3	1/2	1	3	3	0.2106
5 Риск	1/3	1	1/3	1/3	1	1/5	0.0542
6 Стоимость	1/5	7	1/3	1/3	5	1	0.1362

Таблица 2. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Энергетические возможности» (вес признака 0.1918, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	12/13	12/12.5	0.3200
2 «Атлас-5»	13/12	1	13/12.5	0.3467
3 «Дельта-4»	12.5/12	12.5/13	1	0.3333

Таблица 3. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Гибкость» (вес признака 0.0463, $n = 3$, $\lambda = 3.0649$, ИС = 0.0324, ОС = 0.0559)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	1/7	1/5	0.0719
2 «Атлас-5»	7	1	3	0.6491
3 «Дельта-4»	5	1/3	1	0.2790

2. Гибкость — количество возможных комплектаций ракет-носителей семейства (стартовыми ускорителями, верхними ступенями, обтекателями).

3. Адаптируемость — оценка соответствия требованиям по условиям для полезных нагрузок.

4. Надежность — отношение числа успешных пусков к общему их числу.

5. Риск технический — оценка новых технических решений.

6. Стоимость пуска.

Таким образом, имеем шесть критериальных признаков — три количественных (№№ 1, 4, 6),

Таблица 4. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Адаптируемость» (вес признака 0.3609, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	1	1	0.3333
2 «Атлас-5»	1	1	1	0.3333
3 «Дельта-4»	1	1	1	0.3333

Таблица 5. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Надежность» (вес признака 0.2106, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	5/6	5/6	0.2941
2 «Атлас-5»	6/5	1	1	0.3529
3 «Дельта-4»	6/5	1	1	0.3529

Таблица 6. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Риск» (вес признака 0.0542, $n = 3$, $\lambda = 3.0649$, ИС = 0.0324, ОС = 0.0559)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	1/5	3	0.1884
2 «Атлас-5»	5	1	7	0.7306
3 «Дельта-4»	1/3	1/7	1	0.0810

Таблица 7. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Стоимость» (вес признака 0.1362, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1 «Ариан-5»	1	110/170	105/170	0.2401
2 «Атлас-5»	170/110	1	105/110	0.3711
3 «Дельта-4»	170/105	110/105	1	0.3888

два качественных (№№ 3, 5) и один (№ 2), который имеет количественное выражение, но его целесообразнее оценивать качественно.

Альтернативы: три семейства ракет-носителей «Ариан-5», «Атлас-5», «Дельта-4».

Расчеты по предложенной методике проводились с использованием специально разработанного программного обеспечения. В табл. 1 приведены ре-

Таблица 8. Результаты многокритериального сравнительного анализа

Альтернативы	Приоритеты	Признаки					
		энергетические возможности	гибкость	адаптируемость	надежность	риск	стоимость
«Ариан-5»	0.2899	0.3200	0.0719	0.3333	0.2941	0.1884	0.2401
«Атлас-5»	0.3813	0.3467	0.6491	0.3333	0.3529	0.7306	0.3711
«Дельта-4»	0.3288	0.3333	0.2790	0.3333	0.3529	0.0810	0.3888

зультаты парных сравнений критериальных признаков по важности, в ее последней колонке — вектор локальных приоритетов критериев. В табл. 2—7 приведены результаты парных сравнений альтернатив по каждому из признаков (шесть матриц парных сравнений и шесть векторов локальных приоритетов проектов в последних колонках таблиц).

В табл. 8 приведены результаты анализа — глобальные приоритеты (в первой колонке) и локальные приоритеты в остальных.

Таким образом, лучшим по системе критериев оказалось семейство ракет-носителей «Атлас-5», что (в данном случае) довольно легко объяснимо: оно лучшее по трем критериям из шести, «на равных» в двух и ни по одному не худшее. Равноценность приоритетов семейств по самому «весомому» критерию (адаптируемость) и близость по трем следующим по весу (надежность, энергетические возможности, стоимость) обусловили сравнительно небольшие различия в глобальных приоритетах этих ведущих семейств (30 %), что свидетельствует о сложившемся уровне в этом секторе ракетно-космической техники, «обязательном» для всех новых участников.

В заключение отметим, что многокритериальный подход к оценке космических проектов и существующих объектов РКТ, а также разработанная на его основе методика позволяют решать для различных наборов критериев и альтернатив задачи сравнительного анализа объектов РКТ, выбора направлений их разработки и модернизации, формирования концепции их эксплуатации, распределения ресурсов в различных проблемных ситуациях.

1. Беклемишев Д. А. Дополнительные главы линейной алгебры. — М.: Наука, 1983.—336 с.
2. Беллман Р. Введение в теорию матриц. — М.: Наука, 1969.—368 с.
3. Воронин А. Н. Системный анализ и многокритериальная оценка космических проектов экспертными методами // Проблемы управления и информатики.—2004.—№ 1.—С. 121—135.
4. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979.—300 с.
5. Ларичев О. И., Браун Р. Количественный и вербальный анализ решений: сравнительное исследование возможностей и ограничений // Экономика и математические методы.—1998.—34, № 4.—С. 97—107.
6. Ларичев О. И., Мошкович Е. М. Качественные методы принятия решений. — М: Физматлит, 1996.—278 с.
7. Ногин В. Д. Упрощенный метод анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журн. вычисл. мат. и мат. физ.—2004.—44, № 7.—С. 1261—1270.
8. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—224 с.
9. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. — Киев: Наук. думка, 2002.—382 с.
10. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. — N. Y.: McGraw-Hill, 1980.
11. Saaty T. L. Decision making for leaders. — Pittsburg: RWS Publ., 2000.—240 p.

MULTICRITERIAL COMPARATIVE ANALYSIS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

*V. P. Gusynin, Yu. M. Goldshtain, V. K. Doroshkevich,
V. I. Kuznetsov, Yu. P. Kuchugurny*

The problem of a comparative analysis of objects of rocket and space technology is formulated in terms of one of fundamental problems of the system analysis, namely, comparisons of objects on set of diverse criteria. A procedure for a comparative estimation based on the method of the analytic hierarchy process is offered as an algorithm. We give an example, namely, a comparison of launcher-carriers, derived with the use of our software.

УДК 729.68

В. Є. Шатіхін¹, Л. П. Семенов¹,
Ю. Г. Артеменко², С. Р. Ігнатович³

¹Національне космічне агентство України, Київ

²Державне конструкторське бюро «Півднієве», Дніпропетровськ

³Національний авіаційний університет — Аерокосмічний інститут, Київ

Вплив вуглепластикових фермових конструкцій сонячних батарей на динамічні характеристики механізму їхнього приводу

Надійшла до редакції 06.09.04

Розглянуто вплив фермових конструкцій з вуглепластику, що призначенні для розміщення блоків з фотоперетворювачами, на динамічні характеристики механізму приводу сонячних батарей космічного апарату. Проведено аналіз власних частот коливань фермових конструкцій сонячних батарей та динамічних характеристик механізму їх приводу для конструкцій з вуглепластику і алюмінієвого сплаву АМг-6. Обґрунтовано переваги виготовлення фермових конструкцій каркасів з вуглепластику методом намотування стосовно досягнення більшої жорсткості конструкції.

Розвиток сучасних космічних апаратів дистанційного зондування Землі (КА ДЗЗ) передбачає досягнення роздільної здатності бортової апаратури спостереження в 1 м та краще. Такі результати отримано не тільки за рахунок використання якісної оптичної апаратури, але і завдяки зменшенню збурем'я КА, що викликані дією зовнішніх сил на КА, пружними властивостями конструкції КА та її елементами, а також зменшенням віброактивності механізмів забезпечуючого та спеціального комплексів.

Актуальність цієї статті полягає в аналізі фермових конструкцій (ФК), що призначенні для розміщення блоків фотоперетворювачів сонячних батарей (СБ), та виготовлених з алюмінієвого сплаву і вуглепластику з урахуванням технології створення останніх щодо їх впливу на динамічні характеристики механізму приводу сонячних батарей (МПСБ) та визначення перспектив подальшого розвитку ФК СБ з вуглепластику.

Аналіз динамічних характеристик просторової стержневої конструкції КА викладено в роботі [15]. Динамічні характеристики стержневої виносної ФК СБ та їхній зв'язок із динамічними характеристиками МПСБ раніше не розглядалися. Вибір для

дослідження МПСБ зумовлений тим, що це є один з найбільш віброактивних джерел КА ДЗЗ [18].

Врахування пружних властивостей конструкції СБ необхідне для точного розрахунку динамічних характеристик МПСБ та прогнозування їх протягом терміну активного існування КА. Це особливо важливо при терміні активного існування КА 10—15 років.

Основні способи напрямків вдосконалення конструкції КА для реалізації досягнення високої роздільної здатності та довготривалого терміну активного існування такі:

1) зменшення амплітуди власних та вимушених коливань конструкції КА за рахунок підвищення жорсткості несучих і обертових елементів конструкції з одночасним збереженням або зменшенням маси конструкції;

2) зменшення теплої деформації конструкції КА завдяки застосуванню термостабільних та ізотермічних конструкцій.

Основним несучим елементом негерметичних КА є фермові та рамні конструкції, що функціонують у широкому діапазоні силових та температурних навантажень і призначенні для розміщення приладів

спеціального комплексу, антенно-фідерних пристрій, двигунних установок, блоків з фотоперетворювачами тощо. До цих конструкцій ставляться високі вимоги щодо високої стабільності та жорсткості при мінімальній масі та стабільному коефіцієнтові лінійного термічного розширення (КЛТР).

Реалізація цієї та інших основних вимог до вдосконалення конструкції КА для досягнення високої роздільної здатності неможлива без широкого застосування нових конструкційних матеріалів, в першу чергу композиційних матеріалів на основі полімерних матриць. Великий спектр волокнистих армуючих матеріалів (скло-, органо-, базальто-, вулексерів волокна та ін.) дозволяє створювати конструкції з унікальним сполученням властивостей. При цьому вдається задовольнити низку суперечливих вимог, чого не можна досягти для «традиційних» матеріалів. Найперспективнішими є композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон, які за основними фізико-механічними (термостабільність, жорсткість, питома вага) суттєво перевищують алюмінієві сплави (табл. 1).

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики вуглепластика та сплаву АМг-6 (коєфіцієнт лінійного термічного розширення, модуль пружності на стиск, густина)

Матеріали	КЛТР, 10 ⁻⁷ 1/K	E _{сж} , Г/мм ²	ρ, г/см ³
Сплав алюмінієвий АМг6	240	7.2	2.64
Вуглепластик (однонаправлений)	0.2	14—20	1.5

Одночасно необхідно відмітити, що створення конструкцій КА з композиційних матеріалів є досить трудомістким процесом, що потребує обґрунтованого вибору матеріалу та матриці, проектування та виготовлення складного технологічного оснащення, використання унікального обладнання, високопрофесійного відпрацювання технології виробництва, а також проведення комплексу досліджень виготовленої конструкції.

Нижче буде подано аналіз коливань ФК СБ, виготовлених з алюмінієвого сплаву та вуглепластику із застосуванням методу автоматизованого намотування.

Розглянемо рівняння руху КА з урахуванням збурюючого моменту, що створює ПСБ, функціонуючи за режимом сеансного (дискретного) стеження за Сонцем. При цьому вважатимемо, що:

- зовнішні сили та сили управління КА не діють;
- вісь обертання колінеарна з однією з осей зв'язаної системи координат;
- моменти, що діють внаслідок наявності перехресних зв'язків між віссю обертання СБ та іншими осями зв'язаної системи координат, мізерні.

Це дозволяє розглядати кутовий рух механічної системи МПСБ + СБ тільки навколо осі обертання СБ, в даному випадку — осі x. Розглядаються максимальні кутові переміщення, що зумовлені роботою МПСБ без компенсуючого маховика та запобіжної муфти:

$$(J_{КА} + J_{СБ}) \frac{d^2\Psi}{dt^2} = J_{СБ} \frac{d^2\gamma}{dt^2}, \quad (1)$$

$$J_{СБ} \frac{d^2\gamma}{dt^2} = C_{II}\delta + M_{TСБ} + M_{IP}, \quad (2)$$

де $J_{КА}$ — момент інерції КА без урахування моменту інерції СБ, $J_{СБ}$ — момент інерції СБ, Ψ — кут повороту КА відносно осі x, γ — кут повороту СБ відносно корпусу КА, δ — кут повороту вихідного валу редуктора з урахуванням кінематичних похібок та мертвого ходу зубчатих передач, C_{II} — сумарна жорсткість кінематичної передачі, що приведена до осі обертання СБ, $M_{TСБ}$ — момент сил тертя на осі обертання СБ, M_{IP} — момент сил пружності СБ.

У більшості випадків динаміка просторової стержневої конструкції описується такою системою диференційних рівнянь [4]:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F, \quad (3)$$

де M — матриця мас конструкції, C — матриця демпфування, K — матриця жорсткості елементів конструкції, F — вектор узагальнених сил, що діють на конструкцію, q — вектор узагальнених переміщень конструкції.

Алгоритм розв'язування зазначеного рівняння реалізується за допомогою кінцевоелементної схеми моделювання, і ця схема може застосовуватись до конструкцій будь-якої складності [4].

Питання про моделювання виносних, у тому числі стержневих конструкцій, розглядалось в багатьох роботах [4, 14]. В статті розглядаються коливання ФК СБ у вигляді моделі центральної силової балки.

Модель конструкції СБ у вигляді центральної силової балки є спрощеною у порівнянні з реальною ФК СБ, але може бути достатньою для попереднього аналізу порівняльних динамічних харак-

теристик конструкцій СБ з вуглепластику, а головне — для аналізу їхнього впливу на динамічні характеристики МПСБ.

Зокрема, варіант моделі центральної силової балки розглядався як один з можливих при проектуванні КА «Океан-О» і показав задовільні результати як щодо характеристик жорсткості конструкції СБ, так і щодо запобігання збігу власних частот системи управління та силової балки.

Були вибрані ФК СБ з АМг-6 та вуглепластику у вигляді просторової силової конструкції. Діаметри більшої частини фітингів становлять 2.5 см.

При розгляді коливань, що зумовлені СБ, вважатимемо КА жорстким тілом, до якого закріплено стержень. Для спрощення вважаємо, що КА має форму циліндра, напрямленого вздовж осі y , стержень — однорідний, ізотропний, має сталу товщину, напрямлений вздовж осі x .

Власні коливання балки описуються рівнянням [2]

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(P \frac{\partial y}{\partial x} \right) - f + \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(J_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) = 0, \quad (4)$$

де x — координати точок балки вздовж осі x , y — відхилення точок балки від осі x , f — розподілене поперечне навантаження, появу якого спричиняють зовнішні сили, що діють на КА та сили внутрішньої взаємодії, μ — маса одиниці довжини балки, E — модуль пружності матеріалу балки, J — момент інерції поперечного перерізу відносно нейтральної осі перерізу, перпендикулярної до площини коливань, J_0 — момент інерції одиниці довжини балки відносно центральної осі, перпендикулярної до площини коливань, P — поздовжня сила, що спрямована вздовж балки.

Довжина балки значно більша від її товщини, тому останнім членом у лівій частині рівняння (4) знектуємо. Крім того, знектуємо також поздовжньою силою.

Після спрощення рівняння (4) набуде вигляду

$$\mu(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = 0. \quad (5)$$

Момент $M_{\text{пп}}$ у випадку балкової моделі СБ у цьому випадку визначається за формулою [4]

$$M_{\text{пп}} = \left[\mu(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \right] \times \times \int_0^l (r + x) dx, \quad (6)$$

де r — відстань від центра осі КА до початку балки, тобто $l = x + r$.

Як видно з рівняння (4), збільшення жорсткості конструкції каркасу забезпечує зменшення коливань СБ. Розв'язки цього рівняння дадуть змогу визначити та порівняти параметри власних коливань із застосуванням вуглепластику та сплаву АМг-6. У табл. 2 наведено порівняльні характеристики фізико-механічних властивостей застосованого вуглепластику та сплаву АМг-6.

Таблиця 2. Фізико-механічні та геометричні характеристики моделей з вуглепластику та сплаву АМг-6

Матеріал	$E_{\text{розт.}} \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$	$\mu, \text{ кг}$	Довжина балки, см	Товщина стисок балки, см	Діаметр балки, см
Сплав АМг-6	6.8	0.0335	910	0.2	10
Вуглепластик	9.5	0.01724	910	0.2	10

Рівняння (5) запишемо у вигляді

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0, \quad (7)$$

де

$$c = \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}. \quad (8)$$

Розглядається жорстке закріплення центральної балки до корпусу КА, тобто

$$y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0.$$

Вирішення таких рівнянь детально описується у роботі [1], тому далі розглянемо лише основні викладки.

Функція $\varphi(x)$ встановлює закон розподілу амплітудних відхилень точок осі балки від рівноважного положення і є формою головного коливання. Кожний власні формі відповідає власна частота p .

Після перетворень рівняння (7) має вигляд

$$EJ\varphi''''(x) - p^2 \mu \varphi(x) = 0, \quad (9)$$

або

$$\varphi''''(x) - k^4 \varphi(x) = 0, \quad (10)$$

де

$$k^4 = \frac{\mu p^2}{EJ}. \quad (11)$$

Рівняння (11) має чотири незалежних розв'язки

$$\cos kx, \sin kx, \cosh kx, \sinh kx. \quad (12)$$

Його загальний інтеграл

$$\varphi(x) = A \cos kx + B \sin kx + C \cosh kx + D \sinh kx \quad (13)$$

містить чотири довільні сталі A, B, C, D , які мають задовільняти крайові умови, тобто умови закріплення кінців балки. Власні частоти коливань p отримуємо за формулою

$$p_i = \frac{(k_i l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}, \quad (14)$$

де l — довжина балки, i — номер частоти коливання.

Амплітуду коливань визначаємо з рівняння

$$\varphi_i(x) = C \left[U(k_i x) - \frac{V(k_i l)}{S(k_i l)} V(k_i x) \right], \quad (15)$$

де V, S, U — функції Крілова.

Для балки, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг-6, з рівняння (15) отримано частоту власних коливань $p = 0.288$ Гц (перша гармоніка) та максимальну амплітуду коливань (лінійне переміщення) $\varphi = 1.147$ см; а для балки, виготовленої з вуглепластику, — $p = 0.403$ Гц і $\mu = 0.986$ см відповідно.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування вуглепластику в конструкціях, виготовлених методом автоматизованого намотування.

Знаючи характеристики коливань ФК СБ, а також геометричні, масові та швидкісні характеристики елементів МПСБ, можна визначити характеристики кількісного впливу ФК СБ на величину збурюючого моменту МПСБ.

Вважаємо за доцільне стисло нагадати концептуальні основи методу автоматизованого намотування та основні результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей ФК (детально див. [6—8, 10—12]).

Метод намотування, який існує майже 60 років, постійно розвивається та надає виробнику нові потенційні можливості. Сьогодні вирішуються питання про намотування конструкцій складніших форм, значного розширення застосування технології намотки при створенні принципово нового технологічного обладнання та виробів з новими структурами армування.

В основі концепції створення ФК автоматизованим намотуванням покладено принцип одночасного підвищення функціональної гнучкості при збереженні точності та стабільності технологічного процесу виготовлення, функціональної надійності ФК із скороченням часу на виготовлення та контроль.

При цьому основний упор зроблено на особливості функціонального призначення ФК СБ, що полягають у забезпеченні фізико-механічних (схема навантаження) та теплофізичних (КЛТР) характеристик при збереженні ряду геометричних обмежень (габарити, форма).

Оцінка переваг та недоліків існуючих ферм з урахуванням зміни умов їхньої роботи дозволяє розробити функціональні схеми ФК СБ (фітингові, безфітингові), а потім на їхній основі — конструктивно-технологічні (збиральні, модульні, інтегральні тощо).

Результати досліджень показали, що виготовлені методом автоматизованого намотування стержні мають більш стабільний КЛТР в межах однієї партії (не більш 13 відсотків) у порівнянні з викладочним варіантом (35 відсотків).

Реалізація технології автоматизованого намотування у виготовленні багатопроменевих фітингів (БПФ) передбачає два методи формоутворення намотуванням композитних структур БПФ: диференційний та інтегральний (детально див. [8]). В основі диференційного методу покладено принцип декомпозиції конструкції БПФ на окремі елементи-промені з наступним синтезом композитних структур методом намотування. Інтегральний метод виготовлення БПФ базується на принципі перепрофілювання сформованих шарів з інтегральної форми на початкову форму оправки.

На основі диференційного та інтегрального методів формування композитних структур розроблено принципово нове технологічне обладнання для виготовлення БПФ.

Незалежно від методу виготовлення фітинги конструктивно виконуються із внутрішньою поверхнею сполучення зі стержнями. Передача зусиль від стержнів до променів фітингів забезпечується клейовим з'єднанням, а жорсткість вузла — структурою матеріалів.

Порівняльний аналіз залежностей величин вигину променя фітингу із склопластику (СП) та вуглепластику від схем армування для різних рівнів навантаження відповідно до досліджень роботи [12] показав, що базовий фітинг з вуглепластику перевищує базовий СП-фітинг за жорсткістю на 14 %. Удосконалені фітинги з вуглепластику з локально підсиленими схемами армування перевищують жорсткість СП-фітингів в 2.25 рази. Крім того, фітинги з вуглепластику на 8...18 % легші — від СП-фітингів.

Одним з напрямків підвищення жорсткості ФК з конструкційних матеріалів є створення безфітингової конструкції інтегральної схеми. В її основу покладено принцип декомпозиції та поетапного

Таблиця 3. Кут повороту стержня γ по його довжині L при тепловому випробуванні ферми з алюмінієвого сплаву та вуглепластику

$L, \text{мм}$	γ	
	Алюмінієвий сплав	Вуглепластик
50	40"	5"
250	0	15
500	40	20
750	80	15
1000	95	10
1250	110	9
1500	110	9

формування структури стінок силових елементів. Характеристика ФК залежить від схеми її поділу на модулі. Поділ на модулі здійснюється в залежності від виду навантаження ФК. Модуль є фрагментом ферми, до складу якого входять кілька стержнів-заготовок з не остаточно сформованими стінками та з'єднаними між собою в єдине ціле під час процесу суміщеного формування. При цьому в залежності від вибраної схеми поділу ФК на модулі схеми армування стержнів-заготовок будуть різними і залежатимуть від місця розміщення у фермі.

Експериментальні дослідження теплофізичних характеристик безфітингових ферм методом голографічної інтерферометрії підтвердили теоретичні висновки щодо більшої жорсткості вуглепластикової ферми, виготовленої методом намотування (табл. 3). Випробування було здійснено на стержнях, що входять до складу ФК [12].

Згідно з цими результатами кут повороту стержня у вуглепластиковій фермі значно менший від кута повороту аналогічного стержня в алюмінієвій фермі.

Це доводить бессумнівну перевагу ФК інтегрального типу, створених методом намотування.

ВИСНОВКИ

1. Моделювання коливань даної ФК СБ у вигляді центральної балки показало зменшення амплітуди лінійних переміщень ФК СБ з вуглепластику у порівнянні з ФК СБ, виготовлених з АМг-6, що має як наслідок зменшення збурюючого моменту, зумовленого функціонуванням МПСБ.

2. Застосування вуглепластику для даної ФК СБ привело до збільшення нижньої частоти коливань ФК СБ приблизно на 20 %, що важливо для запобігання збігу власних частот системи управління КА та силової балки.

3. Експериментальні випробування на стержнях з вуглепластику, виготовлених методом намотування, що входять до складу ФК, показали зменшення кутових переміщень у порівнянні із стержнями, виготовленими з алюмінієвих сплавів, у кілька разів.

Фітинги з вуглепластику, виготовлені методом намотування, мають жорсткість більшу, ніж фітинги із склопластику, на 14—225 % у залежності від схеми армування.

4. Вимагають подальшого продовження роботи з автоматизованого намотування елементів ФК КА, а також розробка та створення нового обладнання для формоутворення складнопрофільних конструктивних елементів при дослідному та серійному виробництві ФК КА нового покоління.

5. Застосування ФК СБ з вуглепластику є доцільним для розробки та створення для КА з довготривалим терміном активного існування.

6. Потребують подальшого продовження роботи з дослідження фізико-механічних характеристик конструкцій з вуглепластику з імітацією умов факторів космічного простору для прогнозування динамічних характеристик МПСБ КА з довготривалим терміном активного існування.

1. Ананьев И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. — М.: Гостехиздат, 1946.—354 с.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1965.—556 с.
3. Волошин В. І., Драповський В. Й., Бушуев Є. І. Стан, перспективи та проблеми ринку послуг дистанційного зондування Землі з космосу // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 41—51.
4. Зтурівський М. З., Бидюк П. И. Анализ и управление большими космическими конструкциями. — К.: Наук. думка, 1997.—450 с.
5. Кореневский Д. Г. Устойчивость динамических систем при случайных возмущениях параметров. — К.: Наук. думка, 1989.—208 с.
6. Малков И. В. Классификация стержневых элементов из композиционных материалов // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту.—1999.—№ 6.—С. 75—78.
7. Малков И. В. К выбору критериев эффективности ферменных конструкций из композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».—1999.—Вып. 17(4).—С. 60—67.
8. Малков И. В. Моделирование технологического процесса формообразования многолучевых фитингов памоткой // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту.—2000.—№ 8(30).—С. 81—85.
9. Рзыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. — М.: Машиностроение, 1977.—472 с.
10. Рач В. А., Малков И. В. Классификация многолучевых фитингов ферменных конструкций из композиционных материалов // Вестник Восточноукр. гос. ун-та. Сер. Машиностроение.—1996.—С. 168—172.
11. Рач В. А., Малков И. В. Концепция создания ферменных

- конструкций космических аппаратов из композиционных материалов // Вісник Східноукр. держ. ун-ту.—1997.—№ 2(6).—С. 138—142.
12. Ситало В. Г., Артеменко Ю. Г., Рач В. А. и др. Размеростабильные элементы ферменных конструкций // Технологические системы.—2004.—3 (23).—С. 5—12.
13. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967.—444 с.
14. Труды VI Международного симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в пространстве: В 2 т. — М.: Наука, 1974.—760 с.
15. Трякин В. П., Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. Оценка резонансных режимов космического аппарата // Космічна наука та технологія.—2004.—9, № 4.—С. 40—44.
16. Черноусько Ф. И., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. — М.: Наука, 1984.—384 с.
17. Gladilin V. S., Sitalo V. G., Artemenko Y. G., et al. Manufacturing of carbon fiber reinforced plastic elements of spacecraft truss structures by winding // Proc. of fourth Ukraine-Russia-China symposium on space science and technology, Ukraine, September 12-17, 1996. — Kiev, 1996.—Vol. II.—P. 552—554.
18. Shlomi Arnon, Kopeika N. S. Laser satellite communications network — vibration effect and possible solutions // Proc. IEEE.—1997.—85, N 10.—P. 1646—1661.

THE EFFECT OF CARBON PLASTIC TRUSS STRUCTURES OF SOLAR ARRAYS ON DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF THEIR DRIVE MECHANISM

*V. Ye. Shatikhin, L. P. Semenov, Yu. H. Artemenko,
S. R. Ihnatovych*

We consider the effect of carbon plastic truss structures on dynamical characteristics of drive mechanism of space vehicle solar arrays. An analysis is made for frequencies of own oscillations of the truss structures of solar arrays and for dynamical characteristics of their drive mechanism for the case of structures from the carbon and plastic as well as from the aluminium alloy AMh-6. We substantiate the advantages of the manufacturing of truss structures of frameworks from the carbon and plastic by the winding method in respect of deriving a higher rigidity of a structure.

УДК 629.7.048.7:629.78

І. І. Сердюк¹, А. І. Хлистун², В. Ф. Хаврошин¹

¹Авіаційний науково-технічний комплекс ім. О. К. Антонова, Київ

²Національний авіаційний університет, Київ

Моделирование температурных условий в зоне размещения ракеты космического назначения на борту самолета-носителя Ан-124-100

Надійшла до редакції 03.11.04

Для авіаційно-космічного ракетного комплексу з пусковою установкою на базі транспортного літака-носія Ан-124-100 розроблено математичну модель температурних умов у зоні розміщення ракети космічного призначення в герметичній кабіні літака-носія. В результаті математичного моделювання визначено температурні умови в зоні розміщення ракети у вантажній кабіні важкого транспортного літака-носія при наземній підготовці та у польоті в зону запуску в холодних і жарких умовах атмосфери.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением развития космических транспортных систем является применение авиакосмических транспортных систем, в которых для старта ракеты космического назначения (РКН) используется пусковая установка на базе транспортного самолета-носителя (СН) [7].

Бортовое оборудование и системы СН должны обеспечивать необходимые условия для нормального функционирования систем РКН на различных этапах ее транспортировки: при наземной подготовке, в полете к месту пуска и при пуске, в том числе температурные условия в зоне РКН при ее размещении в герметической кабине СН.

Регулирование температурных условий в герметических кабинах современных транспортных самолетов осуществляется бортовой системой кондиционирования воздуха (СКВ), в которой в качестве теплоносителя используется атмосферный воздух, сжатый в компрессоре газотурбинного двигателя (маршевой двигательной установки или вспомогательной силовой установки самолета) [2]. Сложность обеспечения необходимых температурных ус-

ловий в герметических кабинах транспортных самолетов обусловлена рядом особенностей: изменением в широких пределах параметров атмосферного воздуха в полете и при наземной подготовке; нестабильностью и динамичным изменением на переходных режимах параметров сжатого воздуха, отбираемого от компрессоров бортовых ГТД на нужды СКВ; большими затратами мощности на СКВ; большой тепловой инерционностью элементов конструкции герметической кабины; сложным теплообменом герметической кабины с атмосферой и внутренними источниками; большой плотностью размещения людей, оборудования и грузов в объемах герметической кабины. При обеспечении температурных условий в герметической кабине СН должен быть также учтен теплообмен с РКН и дополнительная тепловая мощность для обеспечения функционирования систем РКН и пуско-проверочного оборудования.

Математическое моделирование СКВ самолета позволяет в приемлемые сроки и с достаточной достоверностью проводить предварительный анализ температурных условий в кабинах и отсеках самолета, определять потребную мощность СКВ. Герме-

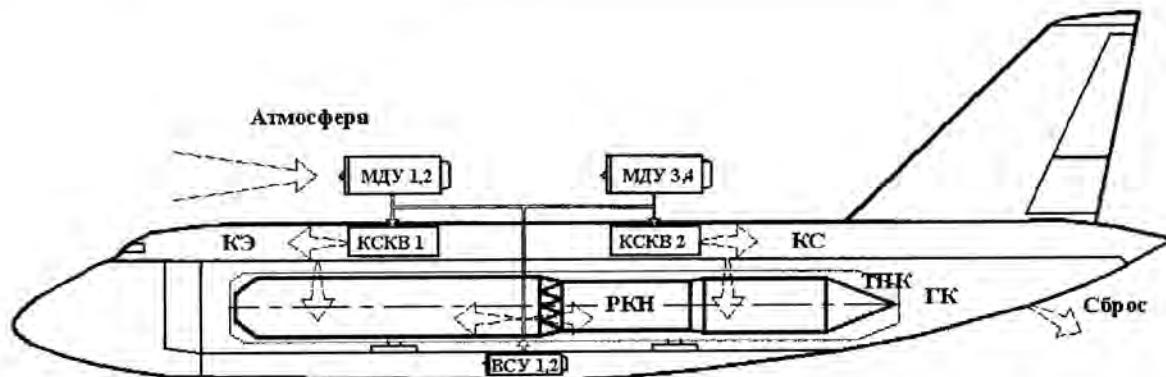


Рис. 1. Схема распределения потоков кондиционированного воздуха в герметической кабине СН: ВСУ — вспомогательная силовая установка, ГК — грузовая кабина, КС — кабина сопровождающих, КСКВ — комплексная система кондиционирования воздуха, КЭ — кабина экипажа, МДУ — маршевая двигательная установка, ТПК — транспортно-пусковой контейнер

тическая кабина транспортного самолета является сложной термодинамической системой, в которой элементы находятся в тепловом взаимодействии между собой и с динамично изменяющимися в широких пределах внешними условиями, а перенос тепла осуществляется теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Моделирование температурных условий в герметической кабине самолета-носителя с ракетой космического назначения представляет собой значительную научную проблему, которая имеет важное значение для развития космических транспортных систем. Математическому моделированию температурных условий в герметических кабинах самолетов посвящены работы [1, 4, 6].

В настоящей работе приводится решение задачи моделирования нестационарных температурных условий в герметической кабине самолета-носителя с ракетой космического назначения и пуско-пророчным оборудованием.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать авиационно-космический ракетный комплекс, который состоит из РКН малого веса и тяжелого транспортного СН.

Особенностью рассматриваемого СН является размещение в фюзеляже трех герметических кабин: кабины экипажа, кабины сопровождающих и грузовой кабины, в которой транспортируется РКН. Каждая кабина имеет независимое регулирование температуры и отличные требования к температурным условиям в них. Теплообмен грузовой кабины с кабиной экипажа и кабиной сопровождающих

имеет существенное влияние на формирование температурных условий в ней: отработанный воздух из кабины экипажа и кабины сопровождающих сбрасывается в грузовую кабину, кабина экипажа и кабина сопровождающих граничат с грузовой кабиной по полу, который имеет большую площадь, и через который осуществляется достаточно интенсивный теплообмен (рис. 1).

Так как температурные условия в герметической кабине транспортного самолета в процессе наземного кондиционирования при предельных температурах окружающей атмосферы являются неуставившимися, а в полете температура атмосферы динамично изменяется в широких пределах, наибольший интерес представляет моделирование нестационарных температурных условий в герметической кабине.

Для авиационно-космического ракетного комплекса решим задачу моделирования нестационарных температурных условий в зоне размещения ракетного комплекса в грузовой кабине самолета-носителя при наземной подготовке и в полете СН к месту пуска.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Температурные условия в герметической кабине СН при кондиционировании формируются как результат процесса теплообмена с тепловыделяющими и теплоглощающими объектами, которые находятся внутри герметической кабины и вне ее, а также в результате работы бортовой СКВ. Внутренними для герметической кабины тепловыми объектами являются: кабинный воздух, элементы конст-

рукции кабины, бортовое электрическое и радиоэлектронное оборудование, люди, перевозимые грузы и пуско-приводное оборудование. К наружным тепловым объектам относятся: атмосферный воздух, облучающий фюзеляж поток солнечной радиации. Тепловое взаимодействие герметической кабиной с СКВ осуществляется за счет подачи кондиционированного воздуха с необходимыми параметрами. При нестационарном процессе теплообмена тепло и холода, получаемые кабинами, расходуются на изменение теплосодержания воздуха в кабине, элементов конструкции кабины, а также оборудования и грузов. Таким образом, герметическая кабина СН является многоемкостным тепловым объектом.

Допущения и определения. При кондиционировании температурные условия являются неодинаковыми по объему кабины учитывая интенсивное перемешивание подаваемого из СКВ воздуха, будем оперировать средней по объему температурой:

$$t_k = \frac{1}{V_k} \int t dV,$$

где V_k — объем кабины, t — средняя температура воздуха в элементарном объеме dV кабины.

Из атмосферы внутрь фюзеляжа самолета подводится количество теплоты равное

$$Q_a = kF(t_a - t_k) + q_c F_o,$$

где k , F — эквивалентный коэффициент теплопередачи и площадь поверхности фюзеляжа, t_a — температура атмосферного воздуха, q_c — удельный тепловой поток солнечной радиации, F_o — суммарная площадь участков фюзеляжа, облучаемых Солнцем.

Эквивалентный коэффициент теплопередачи определяется как средневзвешенное коэффициентов теплопередачи однородных секций, образующих ограждающую конструкцию кабины самолета (пол, потолок, боковые панели и т. п.):

$$k = \frac{\sum k_i F_i}{\sum F_i}, \quad \sum F_i = F,$$

где k_i , F_i — коэффициент теплопередачи и площадь i -й однородной секции. Коэффициент теплопередачи является интегральным параметром, который учитывает конвективный теплообмен на наружной и внутренней поверхностях ограждения кабины и теплопроводность.

Из смежных отсеков в кабину подводится количество теплоты

$$Q_{co} = \sum_j (c_p G_j + k_j F_j)(t_j - t_k),$$

где c_p — удельная теплоемкость для воздуха, G_j — расход воздуха, поступающего из j -го смежного отсека в кабину, k_j , F_j — коэффициент теплопередачи и площадь перегородки между кабиной и смежным отсеком, t_j — температура воздуха в j -м отсеке.

Теплота, выделяемая внутренними источниками (людьми и работающим электрическим и радиоэлектронным оборудованием) определяется для конкретного типа самолета как величина постоянная ($Q_{in} = \text{const}$).

Количество теплоты, подводимой в кабину из СКВ с кондиционированным воздухом, равно

$$Q_n = c_p G_n (t_n - t_k),$$

где G_n , t_n — массовая подача и температура воздуха, поступающего в кабину из СКВ.

Количество теплоты, отдаваемой воздуху кабины внутренними элементами конструкции и оборудования при нестационарном процессе теплообмена, определим следующим образом:

$$Q_o = \sum_i \alpha_i S_i (t_{oi} - t_k),$$

где α_i — коэффициент теплоотдачи на поверхности i -го элемента конструкции, S_i — площадь теплоотдающей поверхности, t_{oi} — температура поверхности.

Ввиду малых перепадов температуры для кабины самолета можно считать, что воздух не участвует в процессе лучистого теплообмена, подвод тепла к воздуху в кабине осуществляется только в результате конвективного теплообмена с поверхностями элементов конструкций и предметов, находящихся в ней. Так как лучистый теплообмен и малая интенсивность конвективного теплообмена внутренних поверхностей кабины способствуют выравниванию температур этих поверхностей, считаем, что температура всех поверхностей теплообмена внутри кабины самолета одинакова ($t_{oi} = t_o$). С учетом этого для количества теплоты, отдаваемой воздуху кабины внутренними элементами конструкции, запишем выражение

$$Q_o = \alpha S (t_o - t_k).$$

Здесь $\alpha = \sum \alpha_i S_i / \sum S_i$ — эффективный коэффициент теплоотдачи на поверхности элементов конструкции, $S = \sum S_i$ — суммарная площадь поверхностей элементов конструкции.

Так как в процессе кондиционирования температура воздуха в кабинах изменяется не более чем на

60–70 °C, можно считать, что теплопроводность k теплоизоляционного материала и коэффициент теплоотдачи α на поверхностях элементов конструкции остаются постоянными. Воздух в кабине транспортного самолета имеет теплоемкость, которая составляет несколько процентов от теплоемкости элементов конструкции кабины, изменение же плотности воздуха, связанное с изменением его температуры при кондиционировании, не превышает 25 %, что позволяет считать теплоемкость и плотность воздуха величинами постоянными. Это допущение может оказываться только при моделировании начального этапа кондиционирования (первые минуты), когда СКВ работает на изменение теплосодержания воздуха в кабине.

Математическое описание. На основании закона сохранения энергии запишем уравнения для изменения температуры воздуха, элементов конструкции и оборудования в кабинах СН при кондиционировании; индексами « Э », « Г », « С », « Р » обозначены параметры и характеристики кабин экипажа, грузовой кабины, кабин сопровождающих и РКН соответственно.

Кабина экипажа. Уравнение для изменения температуры воздуха в кабине экипажа:

$$c_p \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{dt} = c_p G_{\text{нв}}(t_{\text{нв}} - t_{\text{в}}) + k_{\text{в}} F_{\text{в}}(t_{\text{а}} - t_{\text{в}}) + k_{\text{зв}} F_{\text{зв}}(t_{\text{в}} - t_{\text{зв}}) + \alpha_{\text{в}} S_{\text{в}}(t_{\text{ов}} - t_{\text{в}}) + Q_{\Sigma}, \quad (1)$$

где $k_{\text{зв}}$, $F_{\text{зв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопередачи и площадь перегородки между кабиной экипажа и грузовой кабиной, Q_{Σ} — суммарные постоянные теплопритоки от внутренних источников ($Q_{\text{нв}}$) и солнечной радиации ($q_{\text{св}} F_{\text{в}}$).

Уравнение для изменения температуры элементов конструкции и оборудования в кабине экипажа:

$$c_s M_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{dt} = \alpha_{\text{в}} S_{\text{в}}(t_{\text{в}} - t_{\text{ов}}), \quad (2)$$

где c_s , $M_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость и масса элементов конструкции и оборудования в кабине экипажа.

Кабина сопровождающих. Уравнение для изменения температуры воздуха в кабине сопровождающих:

$$c_p \rho_{\text{с}} V_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{dt} = c_p G_{\text{нс}}(t_{\text{нс}} - t_{\text{с}}) + k_{\text{с}} F_{\text{с}}(t_{\text{а}} - t_{\text{с}}) + k_{\text{зс}} F_{\text{зс}}(t_{\text{с}} - t_{\text{зс}}) + \alpha_{\text{с}} S_{\text{с}}(t_{\text{ов}} - t_{\text{с}}) + Q_{\Sigma}, \quad (3)$$

Уравнение для изменения температуры элементов конструкции и оборудования в кабине сопровождающих:

$$c_s M_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{dt} = \alpha_{\text{с}} S_{\text{с}}(t_{\text{с}} - t_{\text{ов}}). \quad (4)$$

Грузовая кабина. Уравнение для изменения температуры воздуха в грузовой кабине:

$$\begin{aligned} c_p \rho_{\text{р}} V_{\text{р}} \frac{dt_{\text{р}}}{dt} &= c_p G_{\text{нр}}(t_{\text{нр}} - t_{\text{р}}) + k_{\text{р}} F_{\text{р}}(t_{\text{а}} - t_{\text{р}}) + \\ &+ c_p G_{\text{нз}}(t_{\text{з}} - t_{\text{р}}) + k_{\text{зр}} F_{\text{зр}}(t_{\text{з}} - t_{\text{р}}) + \\ &+ c_p G_{\text{нс}}(t_{\text{с}} - t_{\text{р}}) + k_{\text{зс}} F_{\text{зс}}(t_{\text{с}} - t_{\text{р}}) + \alpha_{\text{р}} S_{\text{р}}(t_{\text{ов}} - t_{\text{р}}) + \\ &+ \alpha_{\text{р}} S_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_{\text{р}}) + Q_{\Sigma} + Q_{\text{р}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Q_{\text{р}}$ — тепловая мощность, необходимая для обеспечения работы систем РКН.

Уравнение для изменения температуры элементов конструкции и оборудования в грузовой кабине:

$$c_s M_{\text{р}} \frac{dt_{\text{ор}}}{dt} = \alpha_{\text{р}} S_{\text{р}}(t_{\text{р}} - t_{\text{ов}}). \quad (6)$$

Уравнение для изменения температуры конструкции РКН:

$$c_p M_{\text{р}} \frac{dt_{\text{р}}}{dt} = \alpha_{\text{р}} S_{\text{р}}(t_{\text{р}} - t_{\text{п}}). \quad (7)$$

В уравнениях (1)–(7) искомыми являются температуры воздуха $t_{\text{в}}$, $t_{\text{с}}$, $t_{\text{р}}$ и температуры элементов конструкции, оборудования и РКН $t_{\text{нв}}$, $t_{\text{ов}}$, $t_{\text{зв}}$, $t_{\text{зс}}$.

Удельная теплоемкость элементов конструкции и оборудования определяется как средневзвешенное значений удельных теплоемкостей материалов составляющих их элементов:

$$c = \sum c_i M_i / \sum M_i, \quad \sum M_i = M.$$

Характеристика теплообмена на поверхности оборудования αS может быть определена через коэффициент теплоинерционности оборудования $I_t = \alpha S / cM$, для которого А. М. Гершковичем в 1950-х гг. получена эмпирическая зависимость $I_t = 0.00153 + 0.28G_n / \rho V$. Значения характеристик αS и I_t могут быть определены также по данным испытаний с использованием метода параметрической идентификации [5].

Начальные условия для рассматриваемого процесса изменения температурных условий в кабинах СН известны и задаются в виде значений температур $t_{\text{в}0}$, $t_{\text{с}0}$, $t_{\text{р}0}$ и $t_{\text{нв}0}$, $t_{\text{ов}0}$, $t_{\text{зв}0}$, $t_{\text{зс}0}$, $t_{\text{п}0}$ в момент времени $t = 0$

$$\begin{aligned} t_{\text{в}0} &= t_{\text{в}}(0), & t_{\text{с}0} &= t_{\text{с}}(0), & t_{\text{р}0} &= t_{\text{р}}(0), \\ t_{\text{нв}0} &= t_{\text{нв}}(0), & t_{\text{ов}0} &= t_{\text{ов}}(0), & t_{\text{зв}0} &= t_{\text{зв}}(0), \\ t_{\text{зс}0} &= t_{\text{зс}}(0), & t_{\text{п}0} &= t_{\text{п}}(0). \end{aligned} \quad (8)$$

Система уравнений (1)–(7) с начальными условиями (8) дают полную математическую формули-

ровку для нахождения неизвестных температур t_s , t_c , t_f и t_{∞} , t_{oc} , t_{or} .

Метод решения. Система дифференциальных уравнений (1)–(7) с начальными условиями (8) решалась численно, для этого использован метод типа «предсказание — коррекция», в котором значения нового вектора зависимой переменной определяются по четырем точкам. Метод решения реализован в вычислительной программе для ПЭВМ TEMP, использована подпрограмма НРСГ математической библиотеки FORTRAN [3] (рис. 2).

Для вычислительной процедуры получены вполне удовлетворительные показатели по устойчивости, сходимости, времени счета и точности получаемых решений.

Результаты моделирования. Математическое моделирование проведено для авиационно-космического ракетного комплекса, который состоит из РКН малого веса с двигателями жидкостного типа и тяжелого транспортного СН Ан-124-100. Определены нестационарные температурные условия в зоне размещения РКН в грузовой кабине СН в

процессе наземного кондиционирования от бортовой КСКВ в условиях атмосферы холодного дня $t_{a0} = -50^{\circ}\text{C}$, и жаркого дня $t_{a0} = 50^{\circ}\text{C}$, и в полете в зону запуска РКН в условиях жаркого дня, высота крейсерского полета $H_{kp} = 10$ км, градиент температуры по высоте -6.5 K/km , дополнительная тепловая мощность для обеспечения функционирования систем РКН и пуско-проверочного оборудования 19 кВт.

Результаты расчета приведены на рис. 3.

Выводы

1. Для авиационно-космического ракетного комплекса, который состоит из ракеты космического назначения и тяжелого транспортного самолета-носителя разработана математическая модель температурных условий в зоне размещения РКН при ее транспортировании в герметической кабине СН.

2. В результате математического моделирования определены температурные условия в зоне размещения РКН малого веса в грузовой кабине самолета-носителя типа Ан-124-100 «Руслан» при наземной подготовке и в полете в зону запуска РКН в холодных и в жарких условиях атмосферы при кондиционировании от бортовой системы кондиционирования воздуха.

В расчетных условиях холодного дня ($t_{a0} = -50^{\circ}\text{C}$) при наземной подготовке установившаяся температура воздуха в грузовой кабине $t_r = 11^{\circ}\text{C}$ достигается через 1 ч после включения КСКВ. Допустимая минимальная эксплуатационная температура в зоне размещения РКН -30°C .

В расчетных условиях жаркого дня ($t_{a0} = 50^{\circ}\text{C}$) при наземной подготовке установившаяся температура воздуха в грузовой кабине $t_r = 46^{\circ}\text{C}$ достигается через 2 ч после включения КСКВ. В полете установившаяся температура воздуха в грузовой



Рис. 2. Блок-схема вычислительной программы для определения температурных условий в кабинах СН

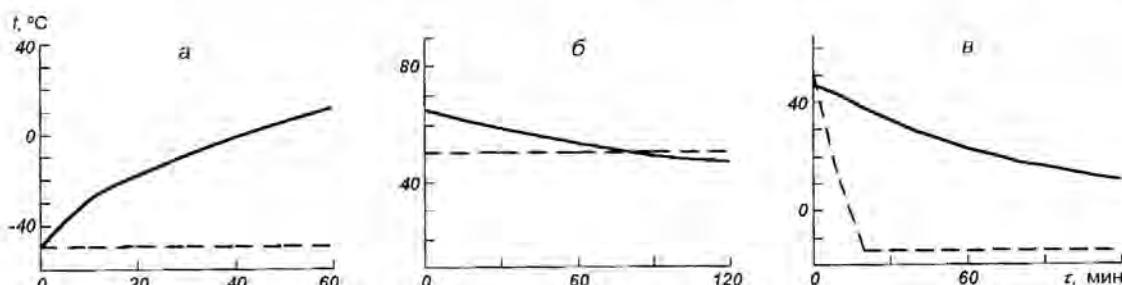


Рис. 3. Расчетное изменение температуры воздуха в зоне РКН на СН Ан-124-100 (сплошная линия — грузовая камера, пунктирная линия — температура атмосферного воздуха): а — условия холодного дня, стоянка; б — условия жаркого дня, стоянка; в — условия жаркого дня, полет

кабине $t_r = 11^{\circ}\text{C}$ достигается через 2 ч после взлета. Допустимая максимальная эксплуатационная температура в зоне размещения РКН $+30^{\circ}\text{C}$.

3. Бортовая система кондиционирования воздуха самолета-носителя типа Ан-124-100 «Руслан» обеспечивает необходимые эксплуатационные температурные условия в зоне размещения РКН в грузовой кабине в процессе наземного кондиционирования и в полете в зону запуска РКН во всем диапазоне ожидаемых температур атмосферы.

4. Направлением дальнейших исследований целесообразно принять определение коэффициента теплоинерционности и характеристики теплообмена ракеты космического назначения по данным испытаний с использованием метода параметрической идентификации.

1. Антипенко И. Н., Данилов Н. Д., Кузнецов В. И. Наземное кондиционирование воздуха в кабинах самолетов. — М.: Транспорт, 1976.—152 с.
2. Воронин Г. И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. — М.: Машиностроение, 1973.—443 с.
3. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ. Пакет научных программ. — Минск: АН БССР, 1973.—Вып. 2.—272 с.
4. Хлистун О. І. Розробка засобів і методів підвищення ефективності систем кондиціювання повітря транспортних літаків: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — К., 1993.—17 с.

5. Хлистун О. І. Метод параметричної ідентифікації математичної моделі температурних режимів кабіни повітряного судна // Вісник Нац. авіац. ун-ту.—2004.—№ 2(20).—С. 72—76.
6. Хлистун А. И., Щербаков Ю. Н. Расчет изменения температуры воздуха в кабинах транспортного самолета при наземном кондиционировании // Авиационная промышленность.—1992.—№ 8.—С. 5—6.
7. Balabuev P. V., Bogdanov O. K., Vovnyanko A. G., Serdyuk I. I. Antonov ASTC's development of the aerospace systems on the basis of An-124 and An-225 aircrafts // Transactions of The World Congress «Aviation in the XXI-st Century», September 14–16, 2003, Kyiv, Ukraine, National Aviation University. — Kyiv, 2003.—P. 2.8—2.13.

TEMPERATURE CONDITIONS SIMULATION IN SPACE VEHICLE PLACE ABOARD AN-124-100 AIRCRAFT

I. I. Serdyuk, O. I. Khlystun, V. F. Khavroshyn

We developed a mathematical model of temperature conditions in space vehicle place aboard an aircraft for an aerospace rocket complex with stating installation on the basis of An-124-100 transport aircraft. As a result of the mathematical simulation, temperature conditions in the cargo cabin of heavy transport aircraft are determined, where space vehicle is placed, during ground preparation and flight in start zone in cold and hot atmosphere conditions.

УДК 629.78

О. С. Урусський¹, В. П. Зубко², С. В. Мотижев³, Я. І. Стефанишин²

¹ Секретаріат Кабінету Міністрів України, Київ

² Національне космічне агентство України, Київ

³ Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь

Міжнародна космічна радіотехнічна система КОСПАС-SARSAT

Надійшла до редакції 18.10.04

Розглянуто основні принципи побудови, функціонування та перспективи розвитку міжнародної космічної радіотехнічної системи КОСПАС-SARSAT, що призначена для виявлення об'єктів, які потерпіли аварію, обґрунтовано доцільність інтеграції України до цієї системи.

Вступ

Космічна діяльність має велике значення для соціально-економічного та культурного розвитку людства. На 3-й конференції ООН з дослідження та мирного використання космосу (UNISPACE III, 1999 р., Віден) було прийнято декларацію про космос та розвиток людства, у якій, зокрема, за-значено, що космічні дослідження і використання космосу мають важливе значення для фундамен-тальних знань про Всесвіт, освіти, здоров'я, моні-торингу довкілля, управління природними ресурсами та надзвичайними ситуаціями, метеорологічного прогнозування і моделювання клімату, супутниково-го зв'язку та навігації.

За своєю природою космічній діяльності притаманний глобальний характер, а тому разом з національними створюються і успішно експлуатуються міжнародні космічні системи, до яких належить КОСПАС-SARSAT (КОСПАС — космическая сис-тема поиска аварийных судов и самолетов, SARSAT — Search and Rescue Satellite Aided Tracking), що призначена для виявлення об'єктів, які зазнали аварії.

Традиційно виявлення та пошук аварійних об'єктів здійснювались за допомогою засобів радіозв'язку. Згідно з міжнародною угодою для цього виді-лені спеціальні аварійні радіочастоти (500 та 2182 кГц; 121.5, 156.8, 243 та 406 МГц) і встанов-лені сдині правила їхнього використання. Як свід-

чить багаторічний досвід, застосування тільки цих засобів було часто недостатнім, особливо якщо інцидент стався далеко від берегової зони. Згідно з додовненням до Конвенції SOLAS-74 (International Convention for the Safety of Life at Sea), з 1983 р. передбачається обов'язкове оснащення морських суден аварійними радіомаяками, що працюють на частотах 121.5 та 243 МГц які, перш за все, призначенні для встановлення факту аварії за допо-могою авіаційних засобів. Використання космічних засобів має суттєві переваги, адже аварійні ситуації частіше за все виникають за несприятливих погод-них умов, коли важко застосовувати авіацію.

Система КОСПАС-SARSAT функціонує з 1977 р., вона розроблялась в рамках співробіт-ництва Національної адміністрації з аeronautики та космосу США (NASA), Міністерства морського зв'язку Канади, Французького космічного агентства (CNES) та Міністерства морського флоту СРСР. При цьому СРСР (правонаступником стала Росія) з одного боку, і США, Францію та Канадою з іншого, самостійно створювались дві технічно су-місні, але практично незалежні системи КОСПАС і SARSAT відповідно [1].

На поточний час користувачами системи є 35 країн, які представлені різними відомствами і ор-ганізаціями (табл. 1), серед яких є космічні, морсь-кі, авіаційні, а також ті, що відповідають за прове-дення аварійно-рятувальних робіт. Протягом 1982—2002 рр. за допомогою системи КОСПАС-

Таблиця 1. Члени системи КОСПАС-SARSAT

Країна	Відомство-представник
Австралія	Австралійська служба морської безпеки
Алжир	Міністерство оборони
Англія	Агентство морської та берегової охорони
Аргентина	Міністерство оборони
Бразилія	Міністерство аeronавтики, директорат електроніки та безпеки польотів
В'єтнам	В'єтнамська корпорація морського зв'язку та електроніки
Греція	Міністерство морської торгівлі
Данія	Адміністрація цивільної авіації
Індія	Індійське космічне агентство (ISRO)
Індонезія	Національне агентство пошуку та рятування
Іспанія	Національний аерокосмічний інститут (INTA)
Італія	Департамент цивільної безпеки
ITDC	Міжнародна телекомуникаційна корпорація (The International Telecommunication Development Corporation)
Канада	Національний секретаріат пошуку та рятування
Китай	Адміністрація морської безпеки, Морський департамент Гонконгу
Корея	Корейська національна адміністрація морської поліції
Мадагаскар	Координатний центр пошуку та рятування
Нігерія	Національне агентство з надзвичайних ситуацій
Нідерланди	Міністерство транспорту, громадських робіт і управління водними ресурсами
Німеччина	Міністерство транспорту
Нова Зеландія	Управління цивільної авіації
Норвегія	Міністерство правосуддя та поліції
Пакистан	Комісія з космосу та атмосферних досліджень (SUPARCO)
Перу	Генеральна дирекція мореплавання і берегової охорони
Південна Африка	Південно-Африканське агентство морської безпеки
Росія	Міністерство транспорту, Державне підприємство «Морський спутник»
Саудівська Аравія	Управління цивільної авіації
Сінгапур	Управління цивільної авіації
США	Національна адміністрація з океану та атмосфери (NOAA)
Тайланд	Департамент авіації
Туніс	Міністерство закордонних справ
Франція	Національне космічне агентство (CNES)
Чилі	Служба пошуку та рятування чилійських авіаційних сил
Швейцарія	Федеральна служба цивільної авіації
Швеція	Шведське рятувальне агентство
Японія	Служба берегової охорони

SARSAT було врятовано 15703 особи, які потерпали в 4485 аваріях, а тільки за 2002 р. — 1411 осіб у 373 аваріях (інтернет-сайт <http://www.cospas-sarsat.org>).

На нашу думку, актуальність цієї роботи зумовлена труднощами, що були при пошуку місць аварій українського пасажирського літака Як-40 в Греції (1997 р.), транспортного літака АН-12 в Анголі (1998 р.), судна «Пам'ять Меркурія», що затонуло в Чорному морі (2001 р.).

СКЛАД ТА ФУНКЦІОNUВАННЯ СИСТЕМИ

Супутникова система КОСПАС-SARSAT, структура якої зображена на рис. 1, базується на космічних апаратах (КА), які знаходяться на навколоzemних геостаціонарних та полярних орбітах (космічний сегмент). До складу наземного сегменту входять пункти приймання та оброблення інформації, координатні і рятувальні центри. Джерелом вхідної інформації для системи є аварійні радіомаяки, які перебувають на транспортних засобах чи переносяться людьми. Обов'язковість оснащення морських та авіаційних транспортних засобів аварійними радіомаяками визначена рішеннями Комітету з безпеки на морі Міжнародної організації морського флоту (IMO — International Maritime Organization) та Міжнародною організацією цивільної авіації (ICAO — International Civil Aviation Organization).

Алгоритм функціонування системи полягає в тому, що у момент аварії автоматично чи інтерактивно вмикається радіомаяк, сигнали, з якого приймаються і ретранслюються космічним сегмен-

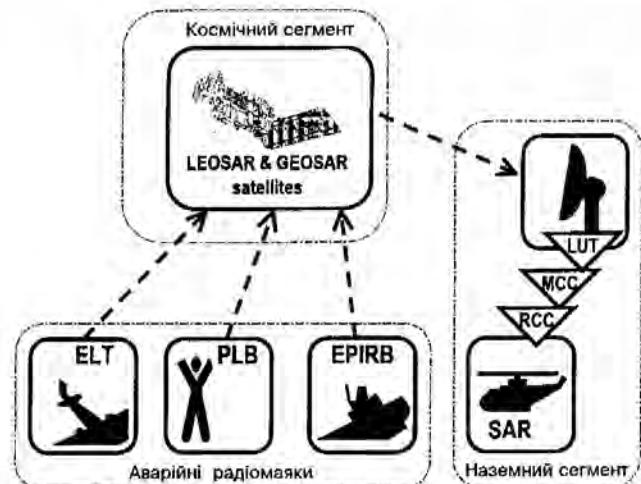


Рис. 1. Структурна схема системи КОСПАС-SARSAT

том на наземний. Географічні координати аварійних радіомаяків, сигнали яких прийняті з полярно-орбітальних КА визначаються автоматично в пунктах прийому та обробки інформації з використанням ефекту Допплера через розв'язування навігаційних рівнянь, для яких траєкторія руху супутника відома. При цьому похибка становить не більше 5 км для радіомаяків на частоті 406 МГц та близько 20 км на частоті 121.5 МГц [1]. Якщо ж сигнал прийнято і ретранслювано геостаціонарним КА, то фіксується факт аварії, а координати отримуються з аварійного повідомлення завдяки супутникової системі глобального визначення місцезнаходження (GPS — Global Positioning System) чи за допомогою полярно-орбітальних супутників. Причому останні, коли знаходяться не в зоні радіовидимості наземного сегменту, приймають і зберігають аварійний сигнал до моменту входження в неї. Якщо у процесі передачі інформації, що зберігається в запам'ятовувальному пристройі КА, приймається сигнал іншого аварійного радіомаяка, то передача даних на наземну станцію переривається, щоб опрацювати прийнятий сигнал та включити його до складу інформаційного кадру.

Космічний сегмент базується на бортовому обладнанні LEOSAR (Low Earth Orbit Search and Rescue) і GEOSAR (Geostationary Earth Orbit Search and Rescue) яке розміщується на полярно-орбітальних та геостаціонарних КА відповідно. LEOSAR входить до складу американських супутників для спостереження Землі серії NOAA, які працюють на сонячно-синхронних орбітах з періодом обертання близько 100 хв та російських КА «Надежда», що знаходяться на орбіті з нахилом 85° та висотою близько 1000 км. При цьому смуга огляду земної поверхні складає близько 4000 км, і в полі зору наземної станції чи аварійного радіомаяка супутник знаходиться не більш ніж 15 хв. Склад космічного сегменту LEOSAR системи КОСПАС-SARSAT станом на початок 2004 р. наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Космічний сегмент LEOSAR системи КОСПАС-SARSAT

Підсистема	Космічний апарат	Дата запуску
КОСПАС	Надежда	12.03.1991
	Надежда	10.12.1998
	Надежда	28.06.2000
SARSAT	Надежда-М	26.09.2002
	NOAA-14	30.12.1994
	NOAA-15	13.05.1998
	NOAA-16	21.09.2000
	NOAA-M	25.06.2002

Бортова апаратура LEOSAR виконує такі функції:

- приймання та підсилення аварійних сигналів на частотах 121.5 та 406 МГц;
- вимірювання допплерівського зміщення частоти;
- запам'ятовування і передача аварійного сигналу та навігаційної інформації на пункти приймання і оброблення інформації на частоті 1544 МГц.

За рахунок обертання Землі і полярно-орбітальної траєкторії руху супутника LEOSAR забезпечує контроль всієї земної поверхні. Це дозволяє також визначити координати місця передачі аварійного сигналу з використанням ефекту Допплера та уточнювати їх при кожному наступному проході над районом аварії. Але з іншого боку головний недолік полярно-орбітальних КА пов'язаний з дискретністю прийому аварійного сигналу і відповідною затримкою в його надходженні на наземний сегмент. При використанні чотирьох КА на орбіті для більшості території Землі затримка у фіксації аварійного сигналу складає близько однієї години, а при шести — менше 20 хв. Перспективним вирішенням цієї проблеми є суміщення аварійно-пошукових функцій та GPS в єдину супутникову систему, яка завдяки необхідній кількості КА в космічному сегменті забезпечуватиме вирішення відповідних завдань в реальному масштабі часу і з мінімальними просторовими похибками.

Використання в системі КОСПАС-SARSAT угруповання геостаціонарних супутників GOES-9, GOES-11, GOES-12 (США), MSG-1 (Європа) та INSAT-3A (Індія), що розташовані над певною точкою у площині екватора на висоті близько 36000 км, здійснюється в експериментальному режимі. У полі зору цих КА знаходиться видимий диск земної кулі, але зона їхньої дії обмежується семидесятими паралелями і не включає приполярні райони. Крім того, через малу відносну швидкість аварійного об'єкта, та практично нерухомого в земних координатах геостаціонарного КА неможливо визначати місце аварії, використовуючи ефект Допплера. Однак можливість виявлення аварійного сигналу в реальному часі та включення до його складу координат об'єкта, отриманих за допомогою GPS, дає свої переваги у використанні геостаціонарних супутників в системі.

Наземний сегмент складають:

- пункти приймання та оброблення інформації LUT (Local User Terminals), для полярно-орбітальних КА — LEOLUT (Low-Earth Orbit LUT) і геостаціонарних — GEOLUT (Geostationary-Earth Orbit LUT);
- координаційні центри MCC (Mission Control Centres);

- рятувально-координаційні центри RCC (Rescue Coordination Centres);
- підрозділи пошуку та рятування SAR (Search and Rescue).

Наземний сегмент системи розширяється з підключення до неї нових користувачів, і станом на початок 2004 р. він складався з 39 LEOLUT, 9 GEOLUT, 24 MCC. Зі складових частин наземного сегменту системи КОСПАС-SARSAT структурно-функціональні особливості мають LUT та MCC. Рятувально-координаційні центри (RCC) і підрозділи пошуку та рятування (SAR) входять до складу загальнодержавних чи регіональних служб реагування на надзвичайні ситуації, а тому тут не розглядаються.

LUT як основа наземного сегменту забезпечує:

- приймання сигналів від космічного сегменту;
- виявлення та декодування групового сигналу аварійних радіомаяків;
- розділення сигналів, отриманих на частотах 406 та 121.5 МГц;
- визначення координат місця аварії за вимірюваними значеннями допплерівського зміщення частоти та прив'язкою вимірювань до системи єдиного часу;
- відображення і формування масиву даних про аварійні маяки і передачі в RCC чи в органи адміністративного управління, а також у MCC;
- облік, накопичення і зберігання аварійних даних;
- отримання з MCC ефемеридних даних супутника (координати місцезнаходження);
- контроль стану бортового радіокомплексу КА.

Стан апаратури LUT перевіряється за допомогою імітатора бортового комплексу, який генерує тестовий сигнал на частоті 1544.5 МГц, аналогічний тому, що поступає з супутника. Функціональна перевірка всієї системи забезпечується контролльними аварійними маяками, що розташовані на деяких LUT, і координати яких відомі. Як видно з табл. 3, зараз в наземному сегменті діє 39 LUT у 23 країнах. Одним з головних параметрів для апаратури наземного сегменту є надійність, яка забезпечується резервуванням процесорів, що обробляють інформацію. На рис. 2 зображено функціональну схему LEOLUT.

Через MCC координується робота космічного та наземного сегментів, а також взаємодія з користувачами. Таким чином, кожний LUT зв'язаний зі своїм MCC, що відповідає за певну зону обслуговування і передачу аварійних повідомлень у найближчий RCC. Зона відповідальності MCC встановлюється залежно від географічного положення, на-

явності засобів зв'язку, стану існуючих національних організаційних структур та засобів порятунку, укладених відповідних угод. Зв'язок MCC між собою здійснюється через міжнародний телекс, телеграфні мережі цивільної авіації AFTN, пакетні цифрові канали X.25, а також інтернет.

Аварійні радіомаяки є джерелом сигналу, що передається під час виникнення аварійної ситуації.

Таблиця 3. Наземні станції приймання та оброблення інформації (LUT) системи КОСПАС-SARSAT

Країна	Місце розташування LUT
Австралія	Albany, Bundaberg
Алжир	Ouargla
Англія	Combe Martine
Індія	Bangalore, Lucknow
Індонезія	Jakarta
Іспанія	Maspalomas (Canary Islands)
Італія	Bari
Канада	Churchill, Edmonton, Goose Bay
Китай	Beijing, Hong Kong
Корея	Daejeon
Нова Зеландія	Wellington
Норвегія	Tromsoe, Spitzbergen
Пакистан	Lahore
Перу	Callao
Південна Африка	Cape Town
Російська Федерація	Архангельськ, Находка
Саудівська Аравія	Jeddah
Сінгапур	Singapore
США	Alaska, California, Guam, Hawaii, Texas
Тайвань	Keelung
Франція	Toulouse
Чилі	Santiago, Punta Arenas, Easter Island
Японія	Yokohama



Рис. 2. Функціональна схема обробки даних в станції LEOLUT

Вони спрацьовують автоматично під дією відповідних датчиків (перевантажень, наявності води тощо) або ж вмикаються вручну. Аварійні радомаяки за призначенням бувають: авіаційні — ELT (Emergency Locator Transmitter); морські — EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon); персональні — PLB (Personal Locator Beacon).

До головних технічних характеристик аварійних радомаяків відносяться: потужність випромінюваного радіосигналу; нестабільність частоти радіосигналу; робочий діапазон механічних та кліматичних параметрів;

Авіаційні аварійні радомаяки (ELT) в залежності від робочої частоти та виду випромінюваного радіосигналу бувають двох типів — аналогові, що працюють на частоті 121.5 (243) МГц, і цифрові, які передають аварійне повідомлення на частоті 406 МГц, а також малопотужний аналоговий сигнал близької дії для рятувальних служб на частоті 121.5(243) МГц. В табл. 4 і 5 приведена класифікація ELT за типами і моделями.

Загалом експлуатується приблизно 170000 ELT з вихідним аналоговим сигналом на частоті 121.5 МГц, причому на них припадає близько 97 % помилкових спрацювань. ELT з робочою частотою 406 МГц спеціально розроблені для використання в системі КОСПАС-SARSAT. Вони значно досконаліші і мають набагато кращі показники щодо помилкового формування аварійного сигналу, а це зменшує витрати і час (в середньому до 6 год) на пошук аварійних об'єктів. ELT на 406 МГц випромінюють сигнал з цифровою модуляцією і з коротким чи довгим форматом повідомлення. У свою чергу, радомаяки з коротким форматом повідом-

Таблиця 5. Моделі авіаційних аварійних радомаяків

Компанія-виробник	Модель	Тип	Особливості
Allied Signal Aerospace, Канада	Rescu-406	S	Батарея живлення, що активується водою
ACK Technologies, США	ACK-E01	AP	
Ameri-King, США	AK-450	AF/AP	
	AK-450-1		Модифікація AK450 для гелікоптера
Ariex Inc, США	ELT-110-406	AF	Датчик перевантаження
	ELT-110-406HM		Модифікація ELT110-406 для гелікоптера, шість датчиків перевантаження
	ELT-110-4		Датчик перевантаження
	ELT-100HM		Модифікація ELT110-4 для гелікоптера. Датчики перевантаження
	ELT-110-6	AP	Переносна модифікація ELT110-4 з запасною антеною
	ELT-200	AF	Мініатюрне виконання
	ELT-200S	S	Датчик води
Caledonian Airborne System Ltd, Англія	CPT-606	AD	
	CPT-612	AP	
CEIS TM, Франція	A06		
	H06		
Cubic Defense Systems Inc, США	ARX-3000		GPS
DRS Technologies Inc, Канада	AN/URT-43	AD	Механізм відділення, датчики перевантаження, гідростатичний датчик, накопичувач політичних даних і переговорів екіпажу.
Emergency Beacon Corp., США	EAS-3000		Накопичувач політичних даних і переговорів екіпажу
	EBC-502	AP	
	EBC-502H		Модифікація EBC502 для гелікоптера
Litton Special Devices, США	952-20	AP	
	952-21	S	
Narco Avionics, США	ELT 910	AF	Датчик перевантаження
Northern Airborne Technol. Ltd, Канада	SATFIND-406ELT		
Pointer Inc, США	3000-10	AF/AP	
	3000-11	AF	
SERPE-IESM, Франція	KANNAD-406ATP	S	П'єзоелектричний датчик перевантаження, запасна антена
Socata, Франція	ELT 96		
Techtest Ltd, Англія	503	AF	Датчик перевантаження

Таблиця 4. Типи авіаційних аварійних радомаяків

Тип ELT	Конструктивні особливості
Стаціонарні AF (Automated Fixed)	Монтуються стаціонарно, і передавач працює на одну зовнішню антenuу
Переносні AP (Automatic Portable)	Монтуються на борту літака в легко доступному місці за допомогою спеціальних кронштейнів, які допускають ручний демонтаж AP і підключення до запасної антени з метою використання за межами аварійного об'єкта
З автоматичним відокремленням AD (Autosplit Deployable)	Відділяється від літака автоматично або за командою пілотів і починає функціонувати при виникненні аварійних ситуацій
Стійкі S (Survival)	Додатково захищений від руйнівних факторів (ударів, перевантажень, вібрацій, води тощо)

Таблиця 6. Технічні характеристики авіаційного радіомаяка ELT 90 фірми SOCATA Groupe Aerospatiale (Франція)

Частота випромінювання, МГц	121.5; 243
Потужність випромінювання, не менше, мВт	100
Нестабільність частоти випромінювання (за 15 хв), не більше	$2 \cdot 10^{-7}$
Струм споживання, не більше, мА	170
Термін безперервної роботи, не менше, год	48
Індекс модуляції, %	85
Діапазон частот модулюючого сигналу, Гц	від 300 до 1600
Частота повтору модулюючого сигналу, Гц	від 2 до 4
Діаграма направленості антени, град	
по азимуту	360
по куту місця	від 5 до 60
Поляризація	кругова або лінійна
Габаритні розміри, не більше, мм	83×103×215
Маса, не більше, кг	1.52

лення, в залежності від виду кодування, можуть розділятися на:

- морський протокол з координатами;
- морський протокол користувача;
- протокол з радіопозивним;
- серійний протокол користувача;
- авіаційний протокол користувача;
- випробувальний протокол користувача;
- орбіографічний протокол.

Вибір того чи іншого виду кодування визначається відповідальною національною адміністрацією, але обов'язково у повідомлення включається інформація, яка дає можливість визначити країну та власника судна, що подало аварійний сигнал.

Результати проведених у США спеціальних досліджень показали, що протягом року при використанні радіомаяків з робочою частотою 406 МГц більш ніж на сто чоловік збільшується кількість врятованих і заощаджується декілька мільйонів доларів США на пошуково-рятувальних роботах. Загалом це дає значний економічний ефект, адже сучасний аварійний радіобуй на 406 МГц коштує близько тисячі доларів США. Пропозиції щодо зменшення ціни вдвічі за рахунок зниження жорстких вимог до технічних характеристик не підтримала IMO, бо це могло привести до зниження функціональної надійності системи в цілому. Для прикладу в табл. 6 наведені технічні характеристики авіаційного радіомаяка.

Морські аварійні радіомаяки (EPIRB), як і авіаційні, розділяються за робочою частотою (121.5 та 406 МГц) і типом випромінюваного сигналу (аналоговий чи цифровий), але на сучасних морських транспортних засобах аналогові зразки уже практично не використовуються. EPIRB, що передають

Таблиця 7. Технічні характеристики уніфікованого каналу на 406 МГц для морських аварійних радіомаяків

Частота випромінювання, МГц	406 ± 2
Потужність випромінювання, не менше, Вт	5
Вид модуляції	фазова
Нестабільність частоти випромінювання (за 1 хв), не більше	$2 \cdot 10^{-9}$
Термін безперервної роботи, не менше, год	48
Обсяг цифрового повідомлення, яке передається, біт	144
Тривалість повідомлення, не більше, с	0.5
Термін повторного повідомлення	50 с ($\pm 5\%$)

цифровий аварійний сигнал на частоті 406 МГц, як і ELT, також генерують малопотужний аналоговий сигнал близької дії для пошукових робіт на частоті 121.5 МГц. В залежності від принципу дії EPIRB поділяються на дві категорії: 1 — ті, що вільно виринають з автоматичним відокремленням і 2 — з ручним відокремленням. За діапазоном робочих температур вони можуть бути двох класів: I (від -40 до +55 °C для категорії 1 і від -40 до +65 °C для категорії 2) та II (від -20 до +55 °C для категорії 1 від -30 до +65 °C для категорії 2). EPIRB категорії 1 встановлюються на спеціальному кронштейні, що забезпечує їхнє автоматичне відокремлення від судна та вмикання при зануренні у воду на глибину від 1 до 4.5 м (спрацьовує гідростатичний датчик), тоді як прилади категорії 2 вмикуються вручну, а тому вони розміщаються на судні в доступному для людей місці. В табл. 7 приведені технічні характеристики уніфікованого каналу на частоті 406 МГц, а табл. 8 — моделі EPIRB.

Персональні аварійні радіомаяки (PLB) призначенні для індивідуального використання, що обумовлене для них мінімальну масу, невеликі габарити і живлення від побутових батарей чи акумуляторів і ручне управління. Функціонально PLB не відрізняється від морських та авіаційних радіомаяків, вони дозволяють визначати місце аварії з похибкою 3–5 км, а їхні головні характеристики приведені в табл. 8.

Основні проблеми експлуатації системи КОСПАС-SARSAT пов'язані з формуванням помилкових сигналів аварійними радіомаяками. Так, наприклад, за 1996 р. було 40000 таких випадків. Для зменшення кількості випадкових включень в конструкцію сучасних аварійних радіомаяків входиться двоступенева активація та режим самотестування. Нагальним також є питання принадлежності і правильної реєстрації у відповідності з кодом держави та своєчасне внесення необхідних поправ-

Таблиця 8. Моделі морських і персональних аварійних радіомаяків

Компанія-виробник	Модель	Температурний діапазон	Конструкт. особливості
МОРСЬКІ РАДІОМАЯКИ			
ACR Electronics Inc.	RLB-23	0	1
	RLB-24	0	0
	RLB-23E	1	1
	RLB-27	1 або 0	1
	RLB-28	1 або 0	0
Anritsu Corp.	RJ301A, RJ302A	0	1
Aviation Marine Techol.	Avmar M1-406	0	1
Bitova Electr. Co.	SEVT-406	0	1
Caledonian	CPT-600M	1 або 0	1
Airborne Syst. Ltd.	CPT-600N	0	1
CEIS TM	BSU 85, MT 06	0	0
	BSP 86, M 04, M056	0	1
	M 02	1	1
	M05	1 або 0	1
ENA Telecom. S. A.	ENASAT-406A	0	1
	ENASAT-406M	0	0
GEC-Marconi Rad. Def. Syst.	639 SIU	0	1
Guest Co. Inc.	948, 952-01	0	1
	948, 952-02	0	0
Japan Radio Co.Ltd.	JQE-2A	1	1
	JQE-2A, JQE-3A	0	1
Jorton Electr. A. S.	Tron 30s, Tron 40s	0	1
	Tron 45sx, Tron 45s	0	0
Lokata Ltd.	406P(M, PF), ECB, 406-2M	0	0
	406H, 406MH, 406-2A	0	1
McMurdo Ltd.	Lokat LDT 61 (A)	0	1
	Lokat LDT 62 (A)	0	0
MPR Teltech. Ltd.	SATFIND-406TM M	0	1
Musson Co.	ARB-MK(M), Musson-501	0	1
NEC Radio Elec. Ltd.	REB-22, REB-23-01	0	1
	REB-23-02, REB-24	0	0
Northern Airborne Technology Ltd.	SATFIND-406Sarv. EPIRB	0	1 або 0
	SATFIND-406 GPIRB	0	1
Nova Marine Syst. Ltd.	RT 160M	1	1 або 0
	RT 161M, RT 260M	0	1
	RT 161, RT260	0	0
Samyang	EB-10	0	1
SEPTE-IESM	Kannad 406 (S)	0	0
	Kannad 406(FH, PH, WH)	0	1
Sextant	STD 406M	0	0
Skanli	TP2	1	1
St. Des. Bureau of Radiocom.	SM-511	0	1
TOYO Com. Equip. Co. Ltd	C-2277	0	1
ПЕРСОНАЛЬНІ РАДІОМАЯКИ			
CEIS TM	P-07	0	
	P076	0	
MPR Teltech Ltd	L-1000	1	
Musson Co.	ARB-M	0	
Northern Airborne Technology Ltd.	SATFIND-406 Pocket PLB	1	
SEPTE-IESM	Kannad 406m	1	
	Kannad 406XS	0	
Techtest Ltd.	PLB 500-4	1	
	PLB 500-20	1	
Yaroslavsky Radio Engineering Works	ARB-PK	0	
	ARB-PK1	1	
	ARB-PK10	1	
	ARB-PKE «Excom»	1	

В колонці «Температурний діапазон» вказано діапазон робочих температур: 0 — від -20 до +55 °C; 1 — від -40 до +55 °C; в колонці «Конструктивні особливості» 1 — конструкція забезпечує автономне плавання

вок при зміні власників транспортних засобів. Саме на вирішення цих питань направлені постійні зусилля секретаріату КОСПАС—SARSAT, який є адміністративним органом системи, а також IMO та ICAO від яких залежить ефективність її використання.

На цей час загалом експлуатується близько 590000 радіомаяків всіх типів з частотою випромінювання 121.5 МГц та 35000 на 406 МГц. Суттєве збільшення кількості радіомаяків привело до необхідності розширення полоси частот. Разом з основною частотою 406.035 МГц в системі почали використовувати 406.028 МГц і додатково зарезервовано 406.031 МГц. Розробка, узгодження та введення в дію технічних і нормативно-регламентуючих документів є однією з головних функцій секретаріату системи.

Подальший розвиток системи КОСПАС-SARSAT планується за рахунок використання геостаціонарних супутників зв'язку для підвищення оперативності передачі аварійних сигналів, а також включенням до складу аварійних радіомаяків приймачів GPS, які забезпечують точне визначення координат місця аварії, що значно розширить можливості її застосування. За оцінкою адміністративних структур США кількість потенційних користувачів системи тільки в цій країні може досягти декількох мільйонів за рахунок туристів і альпіністів, власників яхт та моторних човнів, мисливців і рибалок, спортсменів, особливо гірськолижників, тобто тих категорій, які часто потрапляють в аварійні ситуації.

ВИСНОВКИ

Міжнародна космічна радіотехнічна система КОСПАС-SARSAT відіграє важливу роль у підвищенні безпечноного проживання населення нашої планети, особливо під час пасажирських перевезень, туристичних і спортивних заходах, перебуванні в гірських умовах чи важкодоступних місцях, що визначає її соціально-економічну значимість, актуальність функціонування, вдосконалення і розвитку.

На цей час серед членів КОСПАС-SARSAT не має представників нашої держави, але ми переко-

нані, що в цьому є як нагальна потреба, так і відповідні можливості. Міністерство транспорту та зв'язку України, оснастивши відповідні транспортні засоби, особливо міжнародного сполучення, аварійними радіомаяками, значно підвищить безпеку перевезення пасажирів, Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій (МНС) якісно покращить ефективність пошуково-рятувальних робіт в аварійних ситуаціях, Національне космічне агентство України може забезпечити створення та експлуатацію необхідного наземного сегменту і тим самим оптимально використати свій науково-технічний потенціал. Зважаючи на те, що в Україні аварійні авіаційні та персональні радіомаяки не виробляються, а морські виготовляються невеликими партіями компаніями «Муссон» та «Марлін» (м. Севастополь), створення їхнього власного виробництва сприятиме відродженню передових вітчизняних технологій.

Враховуючи загальнодержавне значення та міжвідомчий характер взаємодії в системі КОСПАС-SARSAT, питання щодо приєднання до неї відповідних державних структур потрібно вирішувати на урядовому рівні. При цьому наземний сегмент системи (LUT/MCC) доцільно створювати на базі діючої наземної інфраструктури НКАУ, оснащення транспортних засобів аварійними радіомаяками повинно проводитися під егідою Мінтрансзв'язку, а МНС буде користувачем інформації, що надходить з системи і тим самим якісно підвищить ефективність пошуково-рятувальних робіт.

1. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / Под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1987.—376 с.

THE INTERNATIONAL SPACE RADIOTECHNICAL SYSTEM COSPAS-SARSAT

O. S. Uruskyi, V. P. Zubko, S. V. Motyzhev, Ya. I. Stefanyshyn

We consider the main principles of the construction, operation and development prospects for the international space radiotechnical system COSPAS-SARSAT intended for the detection of objects which became damaged. The advisability of integration of Ukraine in the system is justified.

УДК 523.92

М. І. Стоділка

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів

Дослідження п'ятихвилинних коливань яскравості Сонця: експеримент ДИФОС-Ф

Надійшла до редакції 08.07.04

За даними спостережень потоків неперервного випромінювання Сонця в шести спектральних діапазонах (прилад ДИФОС) шляхом розв'язку інверсної задачі передано випромінювання відтворено глобальні коливання температури в нижній фотосфері Сонця. Точність відтворення коливань за даними ДИФОС у кілька разів перевищує точність за даними SOHO. Показано, що п'ятихвилинні коливання яскравості Сонця породжені глобальними стоячими хвильами, один з вузлів яких припадає на початок області проникної конвекції.

Вперше коливання яскравості Сонця були виявлені під час експерименту ACRIM на супутнику SMM [15], пізніше вони реєструвались під час місії PHOBOS (експеримент IPHIR [7]), а також під час недавніх експериментів на сателітах CORONAS та SOHO. Незважаючи на значний атмосферний шум, варіації випромінювання Сонця спостерігають і в наземних умовах.

Результати спостережень флюктуацій випромінювання Сонця за допомогою приладу ДИФОС під час першої короткої місії CORONAS приведено в роботах [8, 12]: з допомогою фур'є- та вейвлет-аналізу часових рядів ототожнено *p*-моди глобальних коливань, їхню тонку структуру.

Наприкінці липня 2001 р. було виведено на орбіту супутник CORONAS-F. Одним із приладів, розміщених на платформі, є спектрофотометр ДИФОС, призначений для вимірювання флюктуацій інтенсивності випромінювання Сонця як зірки в неперервному спектрі у шести спектральних діапазонах ($\lambda = 350, 500, 650, 850, 1100, 1500$ нм) із шириною смуги пропускання 10—20 % від центральної довжини хвилі, часова роздільна здатність 35.55 с, відносна роздільна здатність по інтенсивності становить одну мільйонну від повної інтенсивності випромінювання Сонця. Дані, отримані приладом ДИФОС, дозволяють вивчати *p*- та *g*-моди власних коливань Сонця.

Оскільки неперервне випромінювання, що реєструється різними каналами, зароджується на різних глибинах в атмосфері Сонця і, крім цього,

ведуться спостереження всього диску Сонця, то ми маємо можливість вивчати поширення глобальних коливань у фотосфері Сонця (в гіршому випадку в нижній фотосфері). Тут розміщується нададіабатичний шар із слабкоефективною конвекцією та початок області проникної конвекції, де змінюються класична поведінка грануляції. До того ж конвективні рухи на масштабах сонячної грануляції приводять не тільки до частотних зсувів, а й до викривлення хвильових фронтів горизонтальною структурою, внаслідок чого виникають моди, що поширяються майже горизонтально [16, 17]; накладання цих хвиль приводить до просторової модуляції коливань. Такою модуляцією можна пояснити, зокрема, відмінність коливань над гранулами та міжгранулами [10, 11, 17]. Спостереження також чітко показують взаємозв'язок між грануляцією та *p*-модами [6, 9].

Сонячна конвекція на масштабах грануляції — це система висхідних та нисхідних конвективних потоків, причому шкала флюктуацій температури та швидкості порядку довжини хвилі акустичних п'ятихвилинних осциляцій в сонячній атмосferі. А отже, ці коливання розсіюються на грануляційній структурі атмосфери. З іншого боку, згідно з даними [14] у шарах проникної конвекції генеруються атмосферні гравітаційні хвилі. Таким чином, як *p*, так і *g*-моди, породжені різними джерелами, можуть давати вклад у глобальні коливання яскравості Сонця внаслідок їхньої конструктивної інтер-

ференції. Механізм генерації осциляцій яскравості Сонця все ще точно не встановлено.

Мета нашої роботи — відтворити за результатами спостережень приладу ДИФОС глобальні висотно — часові варіації температури у фотосфері Сонця, породжені коливаннями його яскравості, та порівняти їх із результатами SOHO, дослідити вплив грануляції на глобальні варіації випромінювання Сонця. Дослідження висотного розподілу глобальних фотосферних коливань Сонця прояснить природу п'ятихвилинних осциляцій яскравості, механізми їхнього збудження.

Завдяки можливості провадити високоточні позатмосферні спостереження, отримувати високоякісні профілі фраунгоферових ліній та розвитку інверсних методів ми можемо відтворювати фізичні умови в атмосфері Сонця. Варіації температури відтворювались шляхом розв'язку інверсної задачі переносу випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова [3].

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Оскільки період обертання супутника складає 95 хв, то кінці таких часових інтервалів засмічені відбитими сигналами від Землі, що спричиняє суттєві сплески досліджуваного сигналу, особливо в ГЧ-каналах [1]. Внаслідок обертання супутника навколо Землі відбувається зміна оптичної товщини атмосфери при спостереженнях. Це породжує низькочастотну модуляцію випромінювання Сонця. Для усунення такої модуляції вхідні сигнали пропустили через фільтр, що залишає складові з періодами, меншими ніж 20 хв.

На рис. 1 приведено часову зміну сигналу (ГЧ-канал) до (рис. 1, а) і після (рис. 1, б) низькочастотної фільтрації. Оскільки часові варіації згаданих сплесків попадають в діапазон досліджуваних частот ми обмежувались дослідженням тільки центральних частин (тривалістю 50 хв) 95-х циклів витків спостережень. Крім цього, ми аналізуємо не абсолютне, а відносне значення сигналу, що виключає поглинання земною атмосферою та зміну відстані до Сонця при русі супутника по орбіті; на жаль, ми не можемо врахувати розсіяніх та відбитих сигналів. При обробці даних з SOHO використовувалися 24-год ряди спостережень.

Отримані таким чином часові ряди подавались на вхід інверсного коду, що відтворює глобальну стратифікацію температури в фотосфері Сонця. Наш інверсний підхід описано в роботах [3, 4]. Визначимо нижню оцінку похибки відтворення варіацій температури (наприклад) сонячної атмосфери за

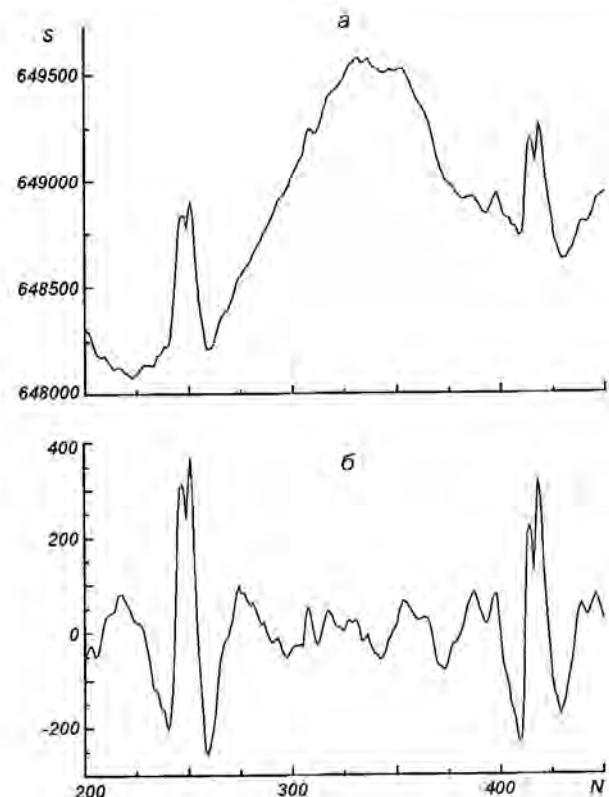


Рис. 1. Сигнал ГЧ-каналу: а — вихідний сигнал; б — сигнал після низькочастотної фільтрації

даними з шести спектральних каналів. Для цього відтворимо наперед заданий сигнал — біжучу хвилю температури. За відомими значеннями температури в кожній точці по висоті атмосфери Сонця в довільний момент часу легко порахувати (в рамках відомої моделі спокійної атмосфери, наприклад VAL80C) варіації неперервного випромінювання в заданих шести спектральних діапазонах. Подаючи отримані варіації випромінювання на вхід інверсного коду, можна відтворити варіації температури і отримати оцінку похибки відтворення на різних висотах. На рис. 2 приведено результати відтворення в фотосфері Сонця біжучої хвилі температури з амплітудою $T_{\max} = 2$. Згідно з отриманими результатами температурні варіації відтворюються на висотах $-75 \text{ km} < h < 250 \text{ km}$. Відносна похибка відтворення показана на рис. 2, б. При $h > 250 \text{ km}$ точність відтворення різко зменшується. Найкраще відтворюються варіації в нижній фотосфері, тут відносна похибка досягає 2 %, а на висотах $-75 \text{ km} < h < 250 \text{ km}$ не перевищує 14 %. Analogічні оцінки були зроблені для приладу VIRGO SPM на SOHO, що реєструє випромінювання тільки

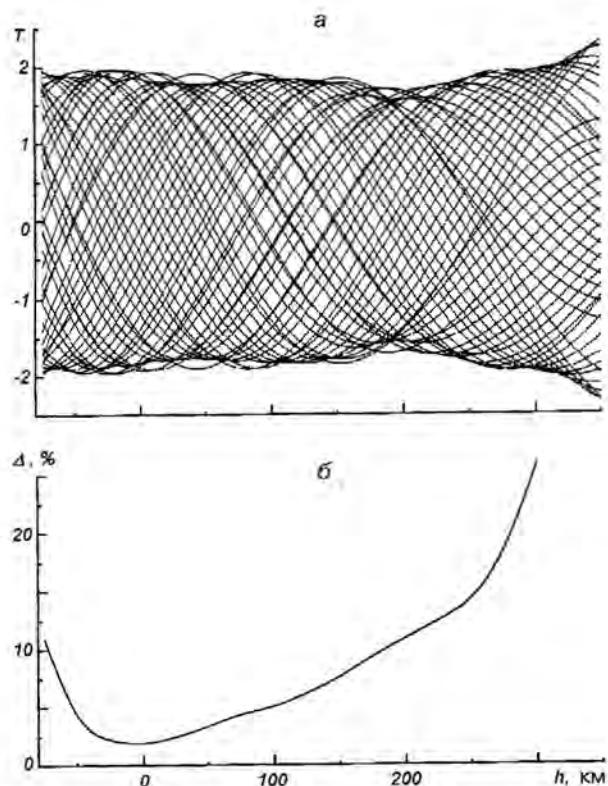


Рис. 2. Результати тестування ішверсного коду: а — відтворення біжучої хвилі; б — висотна залежність відносної похибки відтворення

в трьох спектральних діапазонах, за рахунок чого точність відтворення в два-три рази гірша і діапазон відтворення висот значно вужчий [4].

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТИВ

Збурення температури відтворено в рамках спокійної моделі Сонця (VAL80C) в адіабатичному наближенні. Дані спектрофотометра ДИФОС та відтворені п'ятихвильні осциляції випромінювання в різних спектральних діапазонах приведено на рис. 3; щоб уникнути накладання коливань з різних каналів, часові залежності зміщені одна відносно іншої. Вихідні та відтворювані дані змінюються в часі синхронно; щоправда коливання різних спектральних діапазонів відбуваються не завжди синхронно одне відносно одного. Найкращий збіг даних — в УФ- та видимому діапазонах, в 1Ч-діапазонах — гірший. Оскільки діапазон частот коливань яскравості Сонця досить широкий, ми вирізали вузькі смуги частот, що припадають на різні періоди коливань.

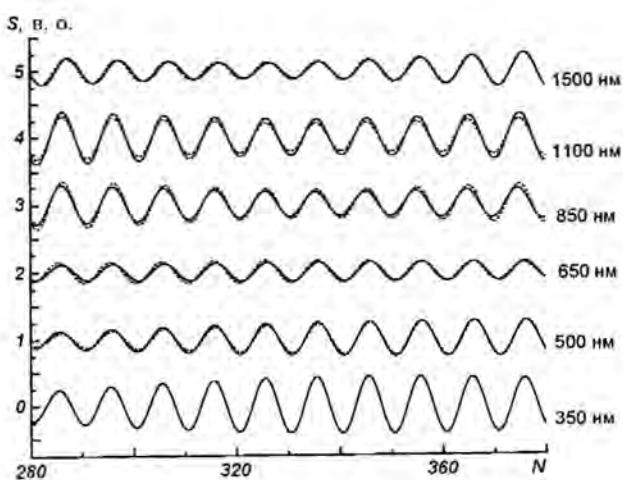


Рис. 3. Дані спектрофотометра ДИФОС-Ф (суцільна лінія) та відтворені осциляції (штрихова лінія) в різних спектральних діапазонах

Відтворена за п'ятихвильними коливаннями висотна стратифікація температури в різні моменти часу показана на рис. 4. Амплітуда коливань з висотою збільшується, збільшується вона і в нижніх шарах ($h < -20$ км). Як видно, варіації температури породжують в фотосфері Сонця глобальну стоячу хвиллю. Враховуючи висотну залежність похибки відтворення (похибка незначна на висотах -75 км $< h < 250$ км), ми можемо визначити положення вузлів та пучностей температури (рис. 4, а); часова розгортка глобальних коливань в двовимірному представленні зображена на рис. 4, б. Один з вузлів при $h \approx 90$ км попадає на початок області проникної конвекції, що може викликати модуляцію амплітуди коливань температури саме в цій області. Але, як видно з рис. 4, б, в вузлі при $h \approx 90$ км фаза змінюється на 180° (що свідчить на користь стоячих хвиль), тоді як в нижньому вузлі ($h \approx -20$ км) зміна фази близька до 180° лише на початку інтервалу спостережень.

Пучності припадають на 50 км та 180 км. Оскільки в фотосфері Сонця утворюється стояча хвилля, то падаюча хвилля повинна відбиватись від шарів, що прилягають до температурного мінімуму. Крім цього, мова йде про одночасне накладання хвиль по всьому диску Сонця; отже, такі стоячі хвилі можуть бути породжені проходженням коливань низьких значень l через атмосферні шари Сонця. Крім цього, для стоячих хвиль відстань між вузлом і пучністю становить $\lambda/4 = 600$ км при $T = 5000$ К; в нашому випадку ця відстань суттєво менша (90 км). Отже, отримана нами глобальна температурна структура, що породжує варіації

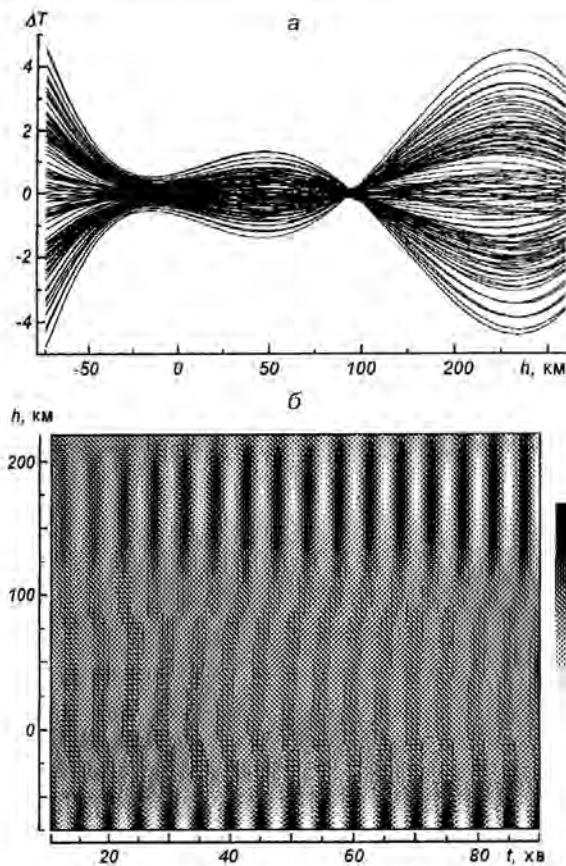


Рис. 4. Глобальні п'ятихвилинні коливання температури: *а* — висотна стратифікація; *б* — часова розгортка коливань

яскравості Сонця, може бути породжена проходженням хвиль, що поширяються не вертикально, а під деяким кутом до горизонту.

Відтворені короткоперіодичні коливання (період 2.5 хв) температури показані на рис. 5. І знову маємо вузол при $h \approx 100$ км, зате в області вершини конвективної зони зміна фази коливань слабко виражена, тут має місце, скоріш за все, модуляція амплітуди коливань.

Оскільки дані ДИФОС в низькочастотній області засмічені відбитим сигналом від атмосфери Землі (зокрема, згідно з рис. 1, *б* в діапазоні 20-хв коливань шумова складова сумірна з самим сигналом), то при вивченні 10-хв коливань було використано дані SOHO. Відтворені десятихвилинні коливання (висотний розподіл та часова розгортка) показані на рис. 6. Картинка 10-хв глобальних коливань аналогічна до 5-хв.

Як бачимо, згідно з результатами відтворення положення верхнього вузла практично однакове при різних частотах (від 1.5 до 6 мГц). Це може бути обумовлене заляганням вузла в перехідному

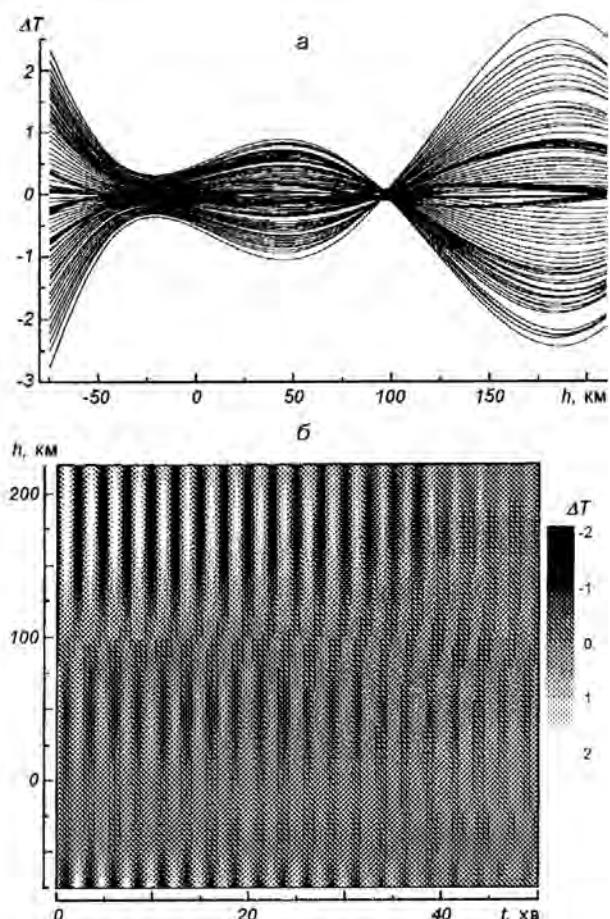


Рис. 5. Глобальні 2.5-хвилинні коливання температури: *а* — висотна стратифікація; *б* — часова розгортка коливань

шарі від класичної до проникної конвекції. Справді, при $h \approx 90$ км варіації температури мінімальні, а отже мінімальними є також варіації і хвильової складової, що сумірна з конвективною складовою [10]. У нижньому вузлі також має місце значне зменшення варіацій температури. Цей вузол залягає в області вершини конвективної зони [5], яка визначається критерієм Шварцшильда [13]. У нас немає вагомих аргументів, щоб стверджувати, чи це вузол, чи результат модуляції температури вершиною конвективної зони. Розмивання фази коливань в нижньому вузлі може бути обумовлене похибками відтворення, частковим відбиванням падаючої хвилі від вершини конвективної зони, або ж відхиленням від адіабатичності в умовах нижньої фотосфери; в цих шарах довгоперіодичні коливання, скоріш за все, ізотермічні.

Отримані дані для різних витків спостережень (прилад ДИФОС) якісно збігаються.

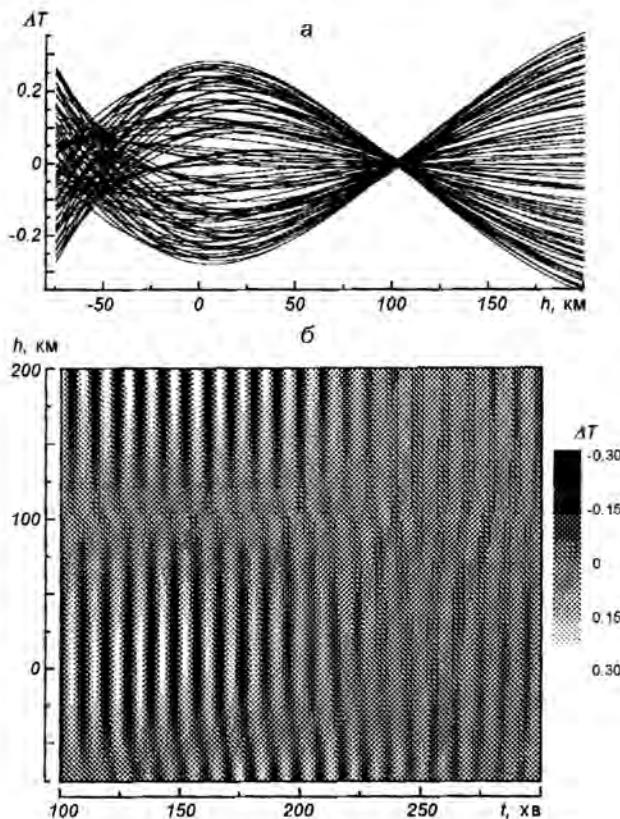


Рис. 6. Глобальні десятихвилинні коливання температури: *а* — висотна стратифікація; *б* — часова розгортка коливань

Таким чином, стояча хвилля виникає в результаті накладання падаючої та відбитої хвилі. Далі, оскільки в верхніх шарах конвективної зони та в переходному шарі до проникної конвекції розсіяння хвиль на просторових неоднорідностях є, очевидно, найбільшим, то із хвиль, що поширяються під різними кутами до горизонту, «виживають» лише ті, які при накладанні падаючої та відбитої хвиль дають вузол при $h = 90$ — 100 км та, можливо, при $h \approx -20$ км.

Згідно з отриманими результатами (рис. 4—6) вузли в деякі моменти часу можуть зникати (один або обидва), а потім появляються знову; вони зникають переважно під час зменшення амплітуди коливань яскравості. Часові варіації глобальних *p*-мод були виявлені в роботі [8].

Взаємодія хвиль з конвективною структурою

Для якісної інтерпретації отриманих результатів розглянемо поширення хвиль в двовимірній грануляції з позицій геометричної акустики. Тобто роз-

глянемо поведінку променів, дотичні до яких збігаються з напрямом поширення хвиль. Навіть не плоску хвиллю можна вважати плоскою з миттєвими її характеристиками. Якщо \mathbf{n} — одиничний вектор, дотичний до променя, то згідно з [2] в *z*-стратифікованому середовищі (швидкість звуку $V_s = V_s(z)$) форма променя визначається рівнянням

$$\frac{dn}{dl} = -\frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{dz} \mathbf{e}_z + \frac{\mathbf{n}}{V_s} \left(n_z \frac{dV_s}{dz} \right),$$

де \mathbf{e}_z — одиничний вектор вздовж осі *oz*, dl — елемент довжини, яку проходить промінь. Згідно з (1) промінь вигинається в сторону зменшення швидкості звуку (температури), а для променів, що поширяються вертикально ($n_z = 1$), відхилення не відбувається. Отже, до стратифікації температури найчутливіші промені, що поширяються майже горизонтально.

При поширенні хвилі в рухомому середовищі швидкість хвилі відносно нерухомої системи відліку дорівнює

$$V = \frac{k}{k} c + u,$$

де k — хвильовий вектор, u — швидкість руху речовини. Через те що конвективна швидкість руху газу в центрі гранули (міжгранули) перевищує її значення на краю, то це призводить до обертання фронту хвилі. Внаслідок цього змінюється напрям поширення хвилі. Будемо вважати, що в сонячній грануляції $u_z = u(x)$ (насправді $u_z = u(x, z)$, а у верхній фотосфері u_x та $u_y \neq 0$). Це призводить до додаткового відхилення променів. Справді [2],

$$\frac{dn_z}{dl} = \frac{n_x}{V_s} \frac{du}{dx}, \quad \frac{dn_y}{dl} = 0.$$

Оскільки

$$n_x = \frac{dx}{dl},$$

то

$$dn_z = \frac{1}{V_s} du.$$

Після інтегрування маємо

$$n_z = n_{z0} + u(x)/V_s,$$

(викривлення променів пропорційне швидкості руху середовища).

Для простоти приймемо, що $n_y = 0$, тоді по n_z можна знайти $n_x = \sqrt{1 - n_z^2}$.

Використавши записане співвідношення, розглянемо поширення хвиль в сонячній грануляції. У

центрі гранули швидкість висхідних потоків максимальна і поступово зменшується до нуля на її боковій стінці; це саме стосується нисхідних потоків для міжгранули. При поширенні хвилі вздовж потоку промені відхиляються в сторону зменшення конвективної швидкості. Отже, якщо плоска хвilia, що рухається вгору, попадає в гранулу, то через градієнт конвективної швидкості промені відхиляються у протилежні боки до стінок чарунки (розвоєння хвилі). При поширенні хвилі проти потоку її траекторія викривлюється у бік збільшення величини конвективної швидкості. Останнє приводить до часткового захоплення хвилі конвективною чарункою і можливого її фокусування на протилежному кінці чарунки.

Зазначимо, що найбільшого впливу зі сторони конвективних рухів зазнають хвилі, що заходять в область грануляції майже вертикально. Внаслідок неоднократних відбивань від верхньої та нижньої межі промені поширяються майже горизонтально. Останні слабко вигривлюються вертикальними конвективними рухами, правда, за умови $u_x \ll u_z$. Промені, що поширяються майже горизонтально, чутливі до горизонтальних конвективних потоків у верхній фотосфері (тут $u_x > u_z$); горизонтальні потоки сприяють відбиванню майже горизонтальних хвиль.

Оскільки відхилення променів відбувається в різні боки відносно центра гранули чи міжгранули, то завжди знайдеться хвilia, що поширяється після відбивання у протилежному напрямку. Це може привести до утворення стоячих хвиль у відповідних шарах атмосфери Сонця.

Горизонтальні масштаби сонячної конвекції змінюються від 6—12 Мм на глибині 6 Мм до 1—2 Мм на поверхні (грануляція). Згідно з [13] грануляція починає формуватись на глибинах порядку 3 Мм. Цього, очевидно, досить, щоб відхилені промені зміщувались на відстань порядку ширини гранули і після відбивання від верхньої межі продовжували відхилятись при поширенні вниз у міжгранулі.

Оцінимо відхилення променів від початкового вертикального напрямку конвективними рухами. Нехай $n_0 = 1$, $V_s = 8$ км/с, а середнє значення конвективної швидкості 1.5 км/с [13]; тоді при проходженні променя від центра гранули до центра міжгранули $\Delta n_z = 3/8$. Отже, $n_z = 0.625$, а $n_x = 0.78$, що відповідає відхиленню променя на 53° . Відбитий промінь буде поширюватись ще під більшим кутом до вертикалі, що свідчить на користь того, що внаслідок викривлення фронту плоскої хвилі конвективними потоками можуть виникати хвилі, що поширяються майже горизонтально.

Насправді в сонячній грануляції розсіяння хвиль

на полі конвективних швидкостей підсилюється температурними неоднорідностями.

Зазначимо, що при поширенні в однорідній фотосфері вгору похилі хвилі стають (через зменшення температури) більш вертикальними (1). Ми ж розглядаємо поширення хвиль у неоднорідній атмосфері. Зрештою, у верхніх шарах нижньої фотосфери настає зменшення градієнту температури, яке підсилюється у міжгранулах інверсією температури на початку області проникної конвекції. А при поширенні відбитих хвиль вниз температурний градієнт, навпаки, відхиляє промені у бік горизонталі.

Ми розглянули результати відтворення глобальних осциляцій температури у фотосфері Сонця, правда, в адіабатичному наближенні, яке не справджується для довгоперіодичних коливань, а тим більше в нижній фотосфері. Цікавими є результати аналогічного дослідження довгоперіодичних осциляцій в ізотермічному наближенні.

Водночас виникає питання: а яка ж природа цих коливань — акустичні чи атмосферні гравітаційні хвилі, що можуть генеруватись в шарах з інтенсивними флюктуаціями густини речовини? Теоретичні дослідження вказують на дисторсію фронтів хвиль, що проходять через грануляційну структуру атмосфери Сонця, але через складність задачі приходиться робити ряд спрощень [16, 17]. З іншого боку, оскільки глобальні осциляції Сонця накладаються на локальні, то в даних, відтворених за профілями з високим просторовим розділенням, повинні бути як локальні, так і глобальні коливання, які можна легко виділити, наприклад шляхом просторової фільтрації. Це дозволить також уточнити — якими модами (p чи g) породжені глобальні коливання яскравості Сонця.

висновки

1. Спостережні дані коливань яскравості Сонця в шести спектральних діапазонах приладу ДИФОС дозволяють відтворювати вертикальну стратифікацію глобальних коливань на висотах: $-75\ldots250$ км, причому похибка відтворення у два-три рази менша, ніж за даними SOHO. Прилад ДИФОС дас більше можливостей при діагностиці глобальних коливань Сонця; щоправда, через сплески сигналу між витками потрібна тонша фільтрація сигналу при дослідженні довгоперіодичних варіацій яскравості Сонця. Результати відтворення глобальних коливань за даними ДИФОС та SOHO якісно збігаються.

2. Амплітуда глобальних коливань температури збільшується у бік верхніх шарів атмосфери

($h > 100$ км) та в нижній фотосфері ($h < -20$ км).

3. Показано, що конвективна структура атмосфери може значно викривляти промені глобальних p -мод від вертикального напрямку поширення.

4. З дослідження висотного розподілу глобальних фотосферних коливань отримано, що п'ятихвилинні коливання яскравості Сонця як зорі породжені глобальними стоячими хвильами, один з вузлів яких припадає на початок переходної області до проникної конвекції ($h \approx 90\ldots 100$ км).

Ми широко вдячні С. М. Осипову за надані нам результати спостережень.

1. Костик Р. І., Осіпов С. М., Лебедев М. І. Перші результати експерименту ДИФОС-Ф // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 10—12.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механіка сплошних сред. — М.: Гос. изд-во техніко-теор. літ-ри, 1953.—788 с.
3. Стоділка М. І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журн. фіз. досліджень.—2002.—6, № 4.—С. 435—442.
4. Стоділка М. І. Застосування інверсних методів при дослідження коливань яскравості Сонця // Журн. фіз. досліджень.—2004.
5. Стоділка М. І. Температурна структура реальної сонячної грануляції // Кінематика і фізика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 407—416.
6. Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al. Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns // Astron. and Astrophys.—1996.—313, N 1.—P. 297—305.
7. Frohlich C., Bonnert R. M., Bruns A. V., et al. IPHIR: The helioseismology experiment on the PHOBOS mission // Seismology of the Sun and Sun-like stars: ESA SP-286.—1988.—P. 359—362.
8. Hasler K.-H., Zhugzhda Y. D., Lebedev N. L., et al. Observation of solar low- l p -modes by the CORONAS-DIFOS experiment // Astron. and Astrophys.—1997.—322.—P. L41—L44.
9. Hoekzema N. M., Rutten R. J. Small scale topology of solar

- atmosphere dynamics. II. Granulation, K2v grains and waves // Astron. and Astrophys.—1998.—329, N 2.—P. 725—734.
10. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // Astron. and Astrophys.—2001.—369.—P. 660—671.
11. Kiefer M., Stix M., Balthasar H. Wave modulation and wave sources in the solar convection zone // Astron. and Astrophys.—2000.—359.—P. 1175—1184.
12. Lebedev N. I., Oraevsky V. N., Zhugzhda Y. D., et al. First results of the CORONAS-DIFOS experiment. Space observations of solar irradiance oscillations // Astron. and Astrophys.—1995.—296.—P. L25—L28.
13. Robinson F. J., Demarque P., Li L. H., et al. Three-dimensional convection simulations of the outer layers of the Sun using realistic physics // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2003.—340, N 3.—P. 923—936.
14. Rutten R. J., Krijger J. M. Dynamics of the solar chromosphere. IV. Evidence for atmospheric gravity waves from TRACE // Astron. and Astrophys.—2003.—407, N 2.—P. 735—740.
15. Woodard M., Hudson H. Solar oscillations observed in the total irradiance // Solar Phys.—1983.—82, N 1.—P. 67—73.
16. Zhugzhda Y. D. Waves and shear flows // Astron. and Astrophys. Transactions.—2003.—22, N 4/5.—P. 593—606.
17. Zhugzhda Y. D., Stix M. Acoustic waves in structured media and helioseismology // Astron. and Astrophys.—1994.—291, N 1.—P. 310—319.

INVESTIGATION OF THE FIVE-MINUTE SOLAR BRIGHTNESS OSCILLATIONS: DIFOS-F EXPERIMENT

M. I. Stodilka

Using observational data on solar continuous radiation flows in six spectral regions, we solved radiation transfer problem and reproduced global temperature oscillations in the low photosphere of the Sun. The accuracy of the reproduction of oscillations by DIFOS data is two or three times higher than that by SOHO data. It is shown that five-minute oscillations of the solar brightness are generated by global standing waves and one of their knots lies at the beginning of the overshooting convection region.

УДК 550.388.520.16+523.31+523.9:520.86

В. П. Бурмака¹, В. Н. Лысенко¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды

Надійшла до редакції 01.11.04

Вивчено хвильові збурення (ХЗ) з періодами 30—120 хв в діапазоні висот 125—500 км (в деяких експериментах 100—1000 км). Вимірювання загальною тривалістю більше 400 годин викопані при різних станах космічної погоди (в умовах спокійної іоносфери, протягом магнітних та іоносферних бур, а також двох затемнень Сонця). Показано, що ХЗ в іоносфері існують майже завжди. Вплив потужних джерел енерговиділення призводить до зміни характеру ХЗ, варіацій їхнього спектрального складу та амплітуд. Останні істотно варіюють протягом доби в залежності від стану космічної погоди. Відносні амплітуди ХЗ змінюються від одиниць до десятків процентів.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование волновых возмущений (ВВ) относится к одной из основных проблем физики атмосферы и геокосмоса [5, 6, 14, 19, 26, 33, 34]. Причины интереса к ним перечисляются в работах [3, 4].

Здесь отметим лишь, что ВВ занимают видное место в системном подходе к исследованию образования тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (система ТАИМ) [22, 23]. Они не только переносят энергию и импульс в системе ТАИМ, а также служат индикатором состояния этой системы в целом и вариаций космической (и метеорологической) погоды в частности.

При изучении ВВ обычно решаются следующие задачи: 1) уточняется роль и проявления различных источников ВВ, 2) определяется величина переносимой ВВ энергии и импульса, 3) выявляется спектральный состав ВВ и его изменения при распространении ВВ, 4) уточняется роль ВВ во взаимодействии подсистем в системе ТАИМ, 5) по характеристикам ВВ изучаются физические про-

цессы в околоземной среде. ВВ могут быть инструментом дистанционной диагностики параметров атмосферы и ионосфера, поскольку дальность распространения ВВ достигает 1—10 тыс. км.

Волновое поле вариаций электронной концентрации $\Delta N(t, r)$ представляет собой результат интерференции большого числа волн с различными периодами (частотами), длинами волн, амплитудами, скоростями распространения, направлениями распространения и т. д. Более того, на квазирегулярные вариации ΔN накладываются случайные флуктуации. Часто, однако, в этом многообразии начинают преобладать ВВ с определенными периодами и амплитудами. Обычно задачей исследователя является выделение именно этих ВВ, так как они обладают наибольшей энергией и более всего влияют на процессы в среде и характеристики распространяющихся в ней радиоволн.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения методом некогерентного рассеяния (НР) волновых возмущений в ионосфере, вызванных вариациями космической погоды.

СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Единственный в среднеширотной Европе радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Харькова ($49^{\circ}36'$ с. ш., $36^{\circ}18'$ в. д.) [21]. Основные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м^2 , коэффициент усиления антенны — около 10 000, ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности около 1° , импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства — до 3.6 МВт и 100 кВт соответственно.

Для выявления ВВ использовалась методика, описанная нами в работе [4]. В качестве исходных выбирались высотно-временные зависимости НР мощности $P_s(z, t)$. После удаления тренда $\langle P_s \rangle$, вычисляемого на интервале времени 60 мин, создавались массивы $\delta P_s(z, t) = P_s - \langle P_s \rangle$. Они подвергались дальнейшему анализу. Для относительных амплитуд ВВ справедливо следующее соотношение: $\delta_N = \Delta N / N \approx \delta P_s / \langle P_s \rangle$.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СПОКОЙНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В данном разделе рассмотрены суточные вариации амплитуд ВВ в дни весеннего и осеннего равноденствий, а также в летний и зимний сезоны. Для характеристики абсолютных ΔN_m и относительных амплитуд ВВ использовались зависимости $\delta P_s(t)$ и $\delta_N(t)$ соответственно. Первая из них пропорциональна ΔN , вторая — $\Delta N / N$.

Период весеннего равноденствия. В период весеннего равноденствия суточная зависимость $N(t)$ имела максимум вблизи местного полудня. Кроме того, через 7–10 ч после него на высотах 200–500 км наблюдался второй максимум примерно такой же величины, как и первый. Такое поведение $N(t)$ предопределяло и суточные вариации $\Delta N(t)$. Временные вариации δP_s и δ_N показаны на рис. 1. Сутки 22 марта 2003 г. относились к слабовозмущенным ($K_p = 2–4$, $A_p = 16$), они пришли на фазу релаксации ионосферной бури [9]. Видно, что амплитуда ВВ с увеличением высоты возрастила. С 4 до 18 ч на всех высотах, как правило, преобладали ВВ с периодами 40–50 мин. В ночное время амплитуда ВВ была в 2–5 раз меньше, чем в дневное время. Величина периода была примерно такой же, как и днем.

Относительные амплитуды ВВ, напротив, были максимальными (20–80 %) в темное время суток. На больших высотах (486–545 км) суточная зависимость выражена слабо, здесь почти все время $\delta_N = 40–80$ %. На высотах $z \leq 200$ км в ночное время оценки δ_N имели большую погрешность, которая иногда достигала 100 %.

Период осеннего равноденствия. Сутки 22 сентября 1998 г. относились к спокойным ($K_p = 1–3$, $A_p = 10$). Временные вариации δP_s и δ_N показаны на рис. 2. Так же, как и в период весеннего равноденствия, суточная зависимость $N(t)$ на высотах $z < 220$ км имела один максимум вблизи летнего полудня. На высотах $z \approx 220–500$ км наблюдалось два максимума. Второй из них приходился на интервал времени 15–18 ч, т. е. почти совпадал с периодом захода Солнца на высотах $z \approx 0–500$ км.

Суточные вариации амплитуд ВВ были значительными на высотах $z \leq 300$ км. Здесь они в дневное время в 2–5 раз были больше, чем в ночное время. На высотах $z \approx 320–500$ км суточные вариации амплитуды ВВ были менее значительными. На всех высотах ВВ имели преобладающий период $T \approx 30–40$ мин. Судя по значениям δP_s , ВВ были сильнее всего выражены в диапазоне высот 200–400 км.

Временные вариации относительных амплитуд были следующими. В диапазоне высот $z \approx 320–500$ км значения δ_N в дневное время находились в пределах 10–20 %, а в ночное время достигали нескольких десятков процентов. На высотах $z < 240$ км в темное время суток величина δ_N изменялась от 40 ± 15 до 60 ± 35 %. Большая погрешность в оценке δ_N на этих высотах обусловлена малым (≤ 0.1) значением отношения сигнал/шум. В светлое время суток здесь $\delta_N \sim 10$ %.

Зимний период. Рассмотрим суточный ход абсолютных и относительных амплитуд ВВ 17 декабря 2003 г., т. е. в период, близкий к зимнему солнцестоянию. Эти сутки были скорее спокойными, чем возмущенными ($K_p = 2–4$, $A_p = 10$).

В суточной зависимости $N(t)$ на высотах $z < 150$ км вблизи местного полудня наблюдался один максимум. Выше примерно на 4 ч раньше и на 4 ч позже полудня начали проявляться еще два максимума — утренний и вечерний. Продолжительность всплесков N была около 2 ч. На высотах $z > 300$ км ночные значения N , постепенно увеличиваясь, достигли дневных значений. Ночной максимум $N(t)$ имел место вблизи местной полночи. Продолжительность увеличения N в ночное время составляла около 8 ч.

Амплитуда ВВ на всех высотах в дневное время в 3—10 раз была больше, чем в ночное время (рис. 3). С увеличением высоты днем амплитуда сначала быстро увеличивалась в 2—3 раза, достигла своего максимального значения на высотах 200—250 км, а затем медленно уменьшалась. На высоте 510 км амплитуда ВВ была в 10—15 раз меньше, чем на высоте 200 км.

Относительная амплитуда ВВ на высотах $z < 200$ км в ночное время была в 2—5 раз больше, чем в дневное время, и составляла 10—50 %. На высотах 220—350 км δ_N днем была примерно в 2 раза больше, чем ночью, и достигала 20—50 %. В диапазоне высот 400—500 км суточная зависимость $\delta_N(t)$ выражена слабо. Здесь $\delta_N = 20—80 \%$.

В течение суток на всех высотах преобладали колебания с периодами 40—60 мин.

Летний период. Поведение амплитуд ВВ в летний период проиллюстрируем на примере результатов, полученных 12 августа 1999 г. (рис. 4). В этот день ионосфера была достаточно спокойной ($K_p = 2—3$, $A_p = 10$).

В летнее время суточная зависимость $N(t)$ на высотах $z < 180$ км имела один максимум вблизи летнего полудня. С увеличением высоты постепенно проявлялись еще два максимума — ночной и вечерний, сдвинутые по отношению к дневному примерно на ± 10 ч. Важно, что вечерний максимум по своей величине всегда превышал ночной и даже дневной. Продолжительности всплесков N составляли около 3 ч.

Как видно из рис. 4, на высотах $z \leq 300$ км амплитуда ВВ в дневное время, как и в течение ночного и вечернего максимумов в зависимости $N(t)$, была в 2—3 раза больше, чем в остальное время суток. На высотах $z > 350—400$ км суточные вариации ВВ выражены слабо. С увеличением высоты от 125 до 510 км для фиксированного интервала времени амплитуда сначала увеличивалась и достигла максимальных значений на высотах 250—260 км, а затем постепенно уменьшалась, на высоте 500 км стала примерно в 5 раз меньше своего максимального значения. Периоды преобладающих колебаний изменились от 30 до 60 мин. При переходе от темного времени суток к светлому и наоборот наблюдались вариации спектрального состава колебаний.

Относительные амплитуды ВВ в дневное время на всех высотах составляли 2—4 %. В ночное время они увеличивались в 2—10 раз на высотах $z = 340$ км. На больших высотах в течение суток $\delta_N(t) = 3—4 \%$.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ИОНОСФЕРНУЮ БУРЮ

Ионосферная буря 20—21 марта 2003 г. описана в работе [9]. Ей предшествовали серия интенсивных рентгеновских вспышек 17, 18 и 19 марта и выбросы корональной массы. Их результатом явилась умеренная ($K_p = 5$, $D_{st, min} = -57$ нТл) магнитная буря, которая началась внезапно около 05:00 20 марта. Заурядная магнитная буря сопровождалась уникальной двухфазной ионосферной бурей [9]. Положительная фаза наблюдалась в интервале времени 12:00—17:00. В течение следующего часа произошла смена фаз. С 18:00 20 марта и все сутки 21 марта имела место отрицательная фаза ионосферной бури.

Амплитуды ВВ δP_s для 20, 21 и 22 марта приведены на рис. 5—7. Видно, что в дневное время 20 марта амплитуды ВВ в среднем в 1.5—2 раза превышали аналогичные характеристики для последующих суток. Это продолжалось примерно 14 ч. Важно, что верхняя высота, где это наблюдалось, на 80 км превышала соответствующие высоты для 21 и 22 марта. Иначе говоря, 20 марта сильные ВВ занимали больший диапазон высот. После внезапного начала МБ в интервале времени 05—09 ч на высотах 133—545 км наблюдались ВВ в основном с периодами 30—40 мин. Затем в течение 7 ч на высотах 192—427 км преобладали ВВ с периодами 60—120 мин. На протяжении всех суток 21 марта в диапазоне высот 192—427 км амплитуда ВВ была в 3—5 раз и 1.5—2 раза меньше, чем 20 и 22 марта соответственно.

Поведение относительной амплитуды ВВ δ_N было иным (см. рис. 1, 5—7). Днем 20 марта в диапазоне высот 320—545 км δ_N была в 1.5—4 раза меньше, чем 21, 22 и 23 марта. Значительно увеличилась δ_N утром и днем 21 марта, особенно на высотах 408—545 км. При этом $\delta_N = 40—80 \%$, тогда как в соседние дни $\delta_N \leq 20—30 \%$.

Пожалуй, наиболее интересным проявлением ионосферной бури, точнее ее отрицательной фазы, в ВВ было значительное увеличение δ_N 21—22 марта на высотах 500—600 км как в светлое, так и темное время суток.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ МАГНИТНЫЕ БУРИ

В этом разделе рассмотрены особенности ВВ, сопровождавших три магнитные бури. Первая из них, крайне сильная (по терминологии [22, 23] $K_p = 9$),

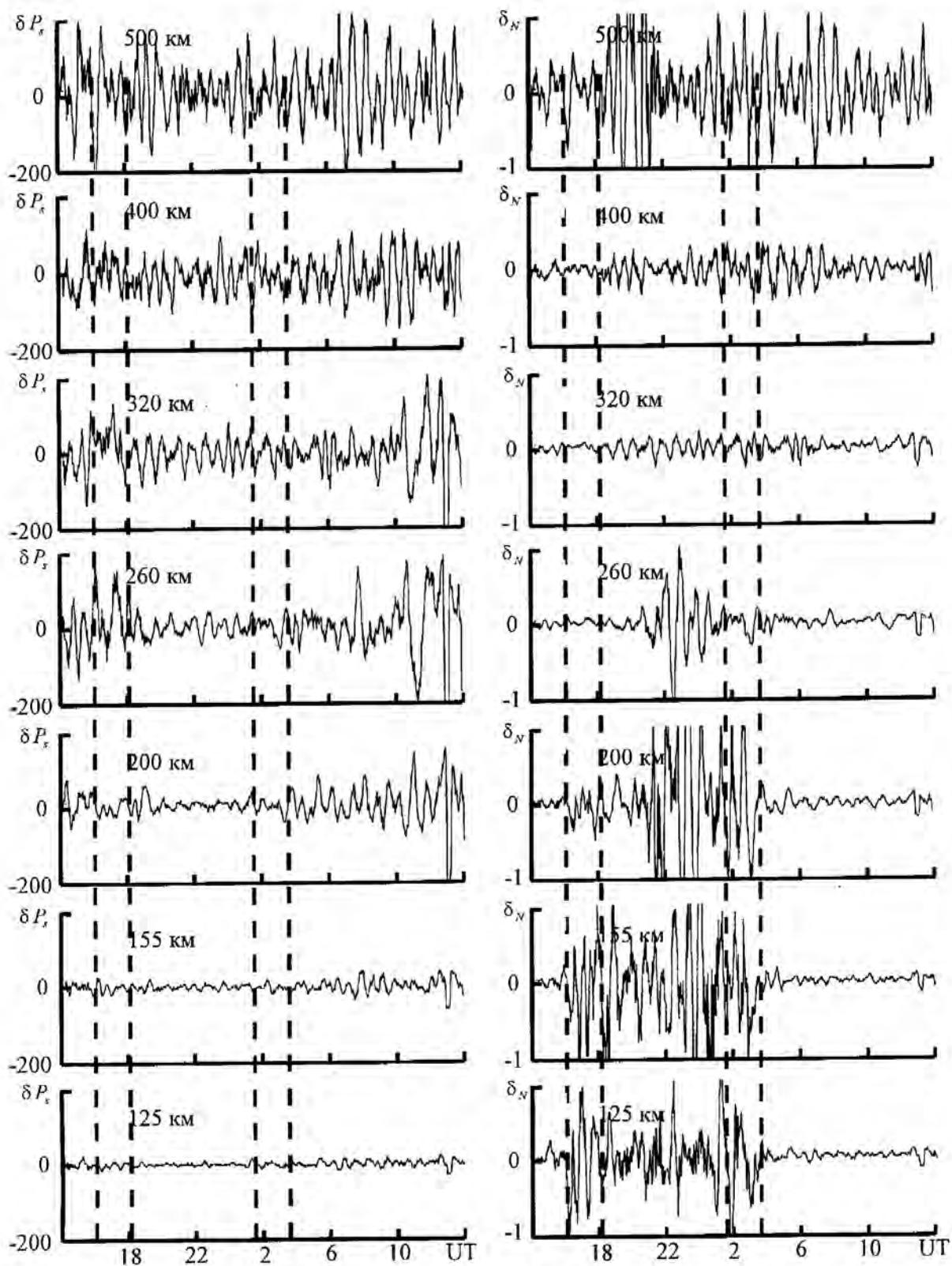


Рис. 1. Временные вариации амплитуд δ_N и относительных амплитуд δP_s ВВ в период весеннего равноденствия (22—23 марта 2003 г.). Здесь и далее пунктирными вертикальными линиями показаны моменты восхода и захода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли

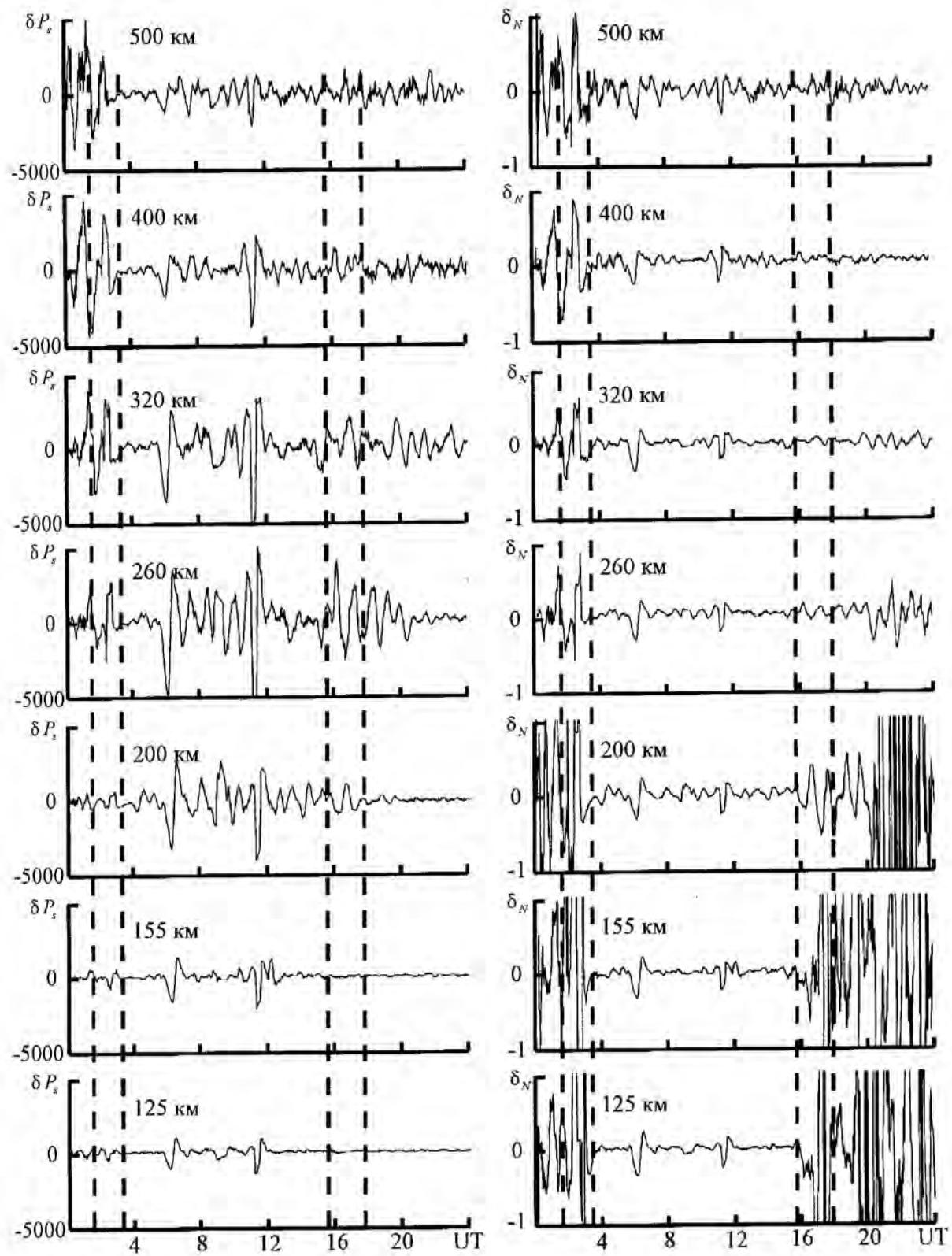


Рис. 2. То же для осеннего равноденствия (22 сентября 1998 г.)

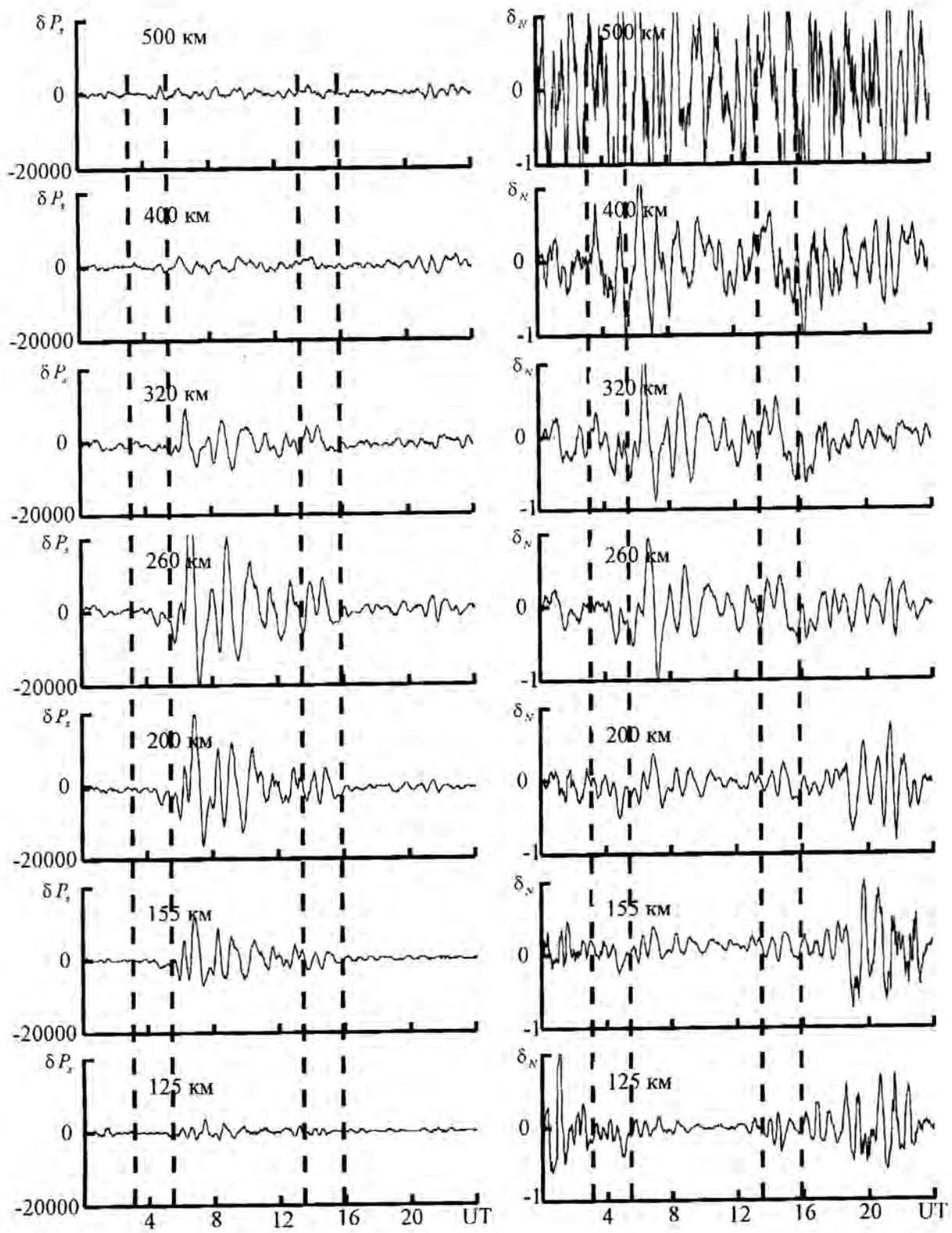


Рис. 3. То же для зимнего солнцестояния (17 декабря 2003 г.)

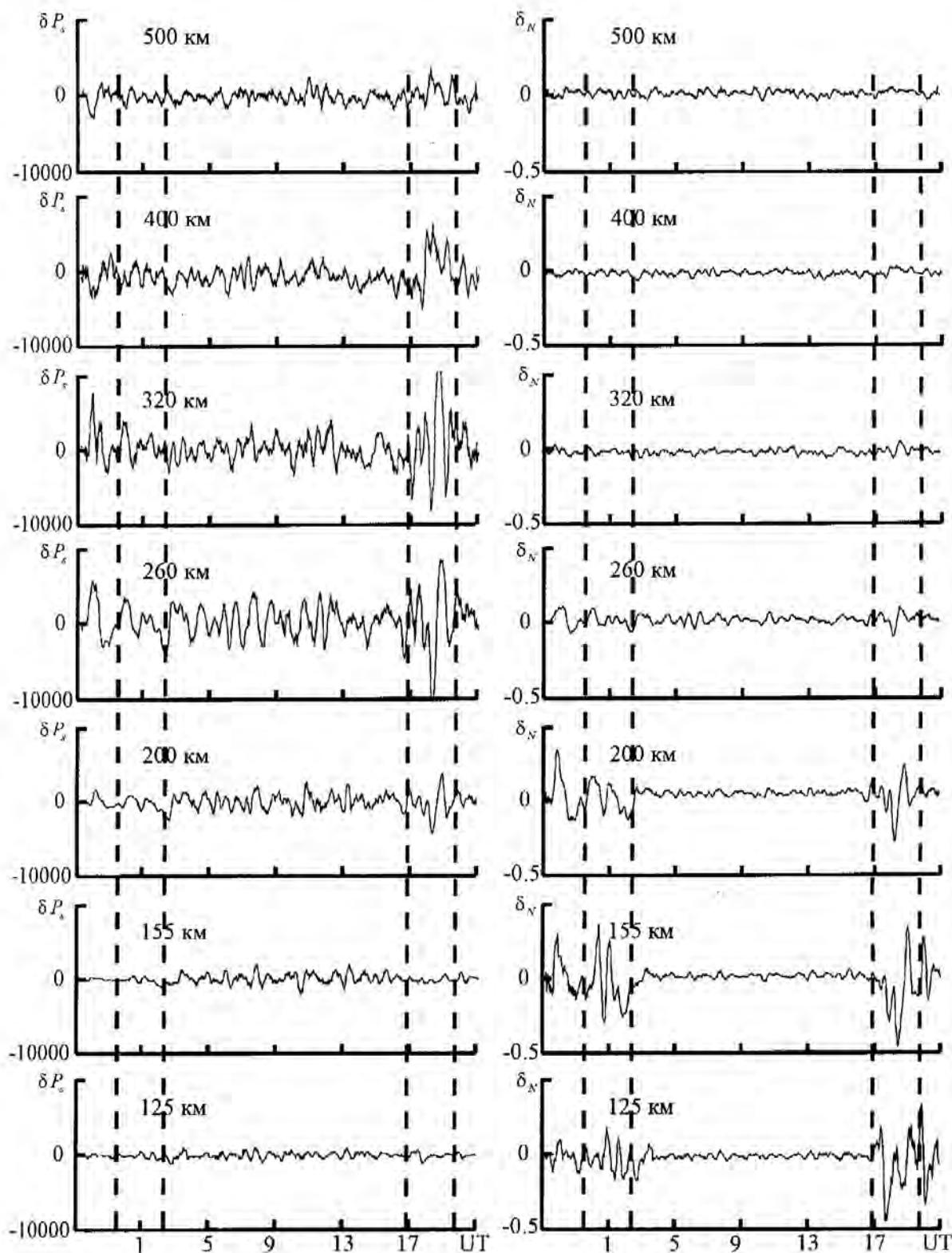


Рис. 4. То же для летнего периода (11—12 августа 1999 г.)

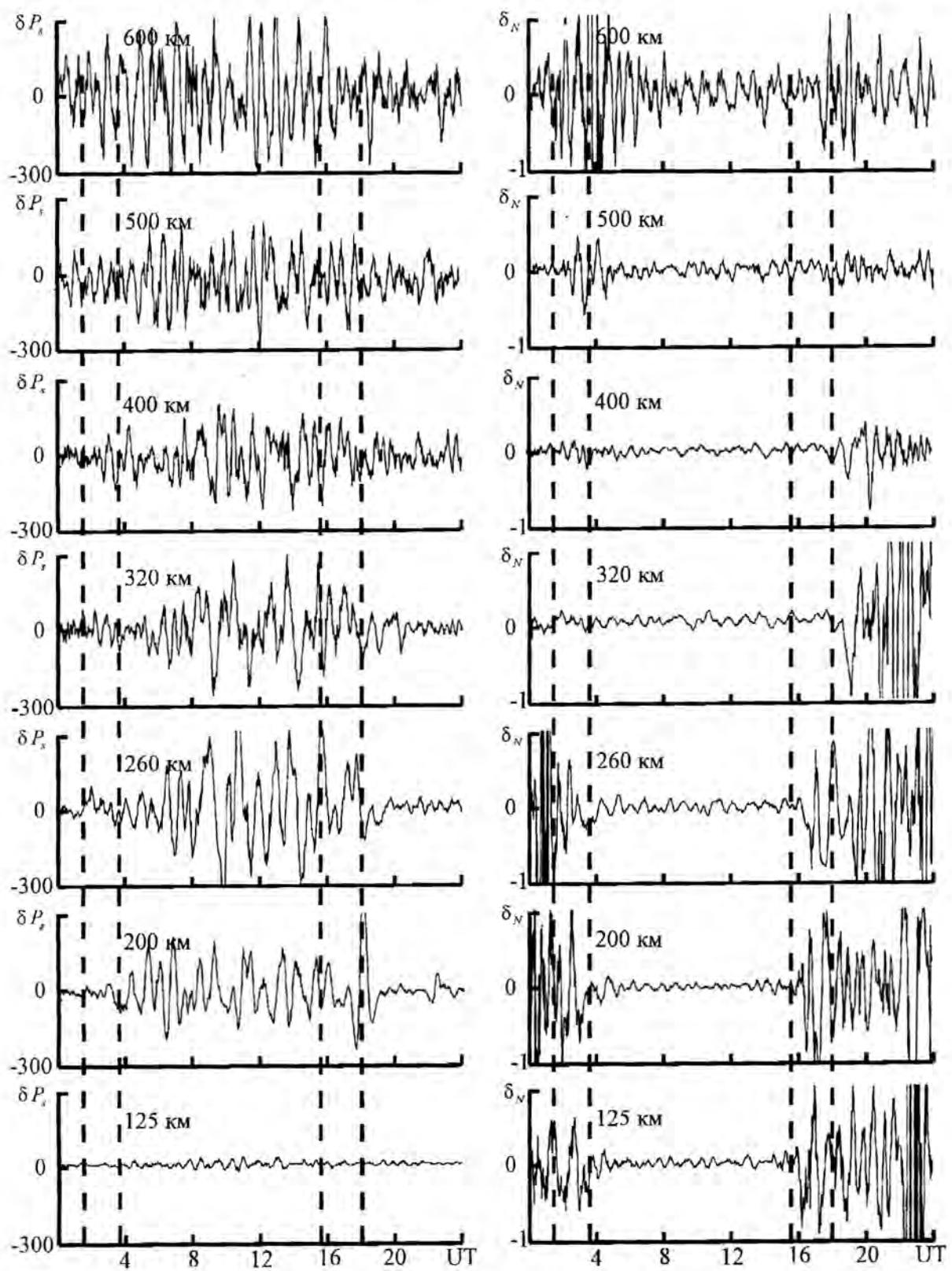


Рис. 5. То же для аномальной ионосферной бури 20 марта 2003 г.

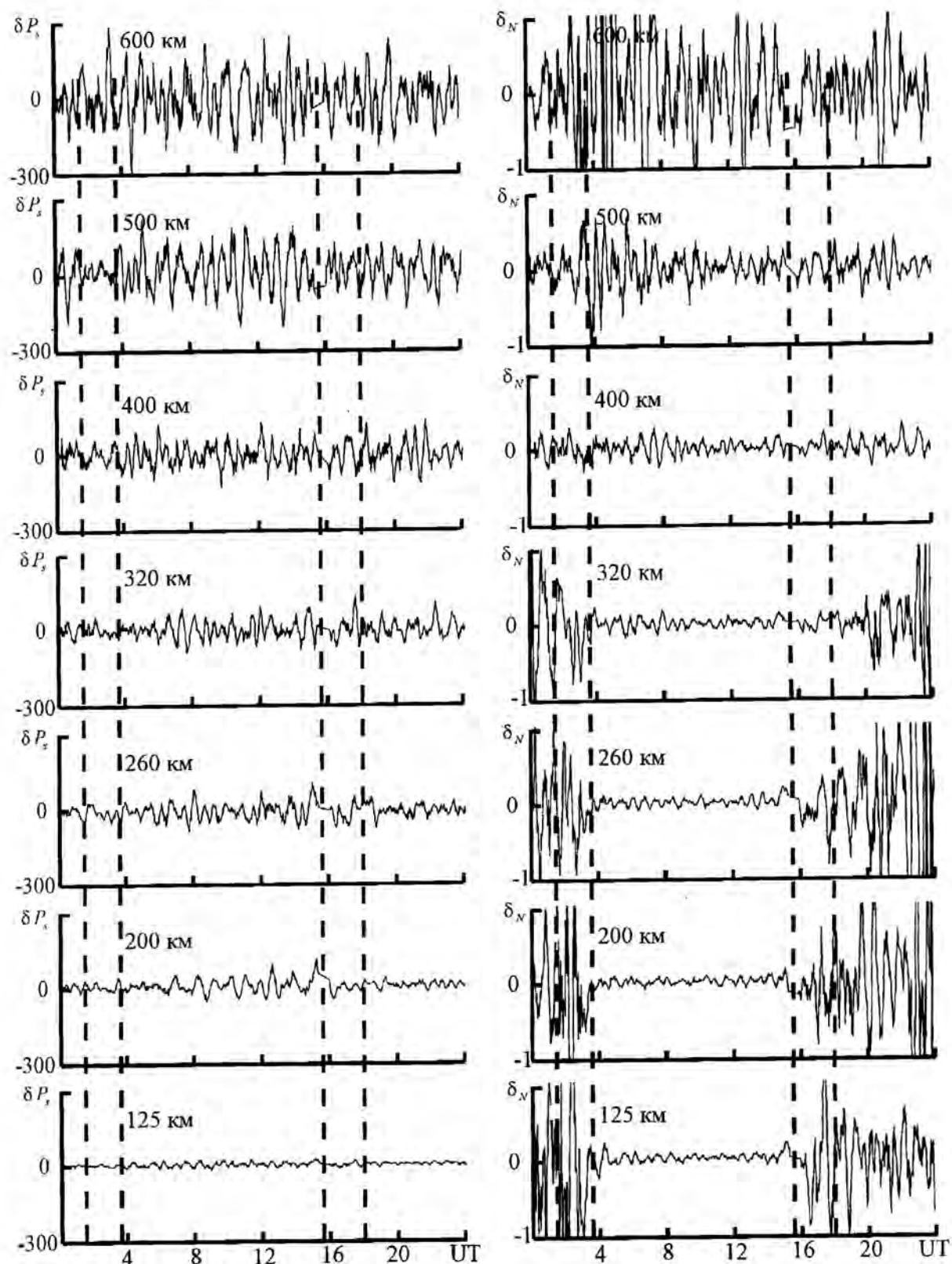


Рис. 6. То же для аномальной ионосферной бури 21 марта 2003 г.

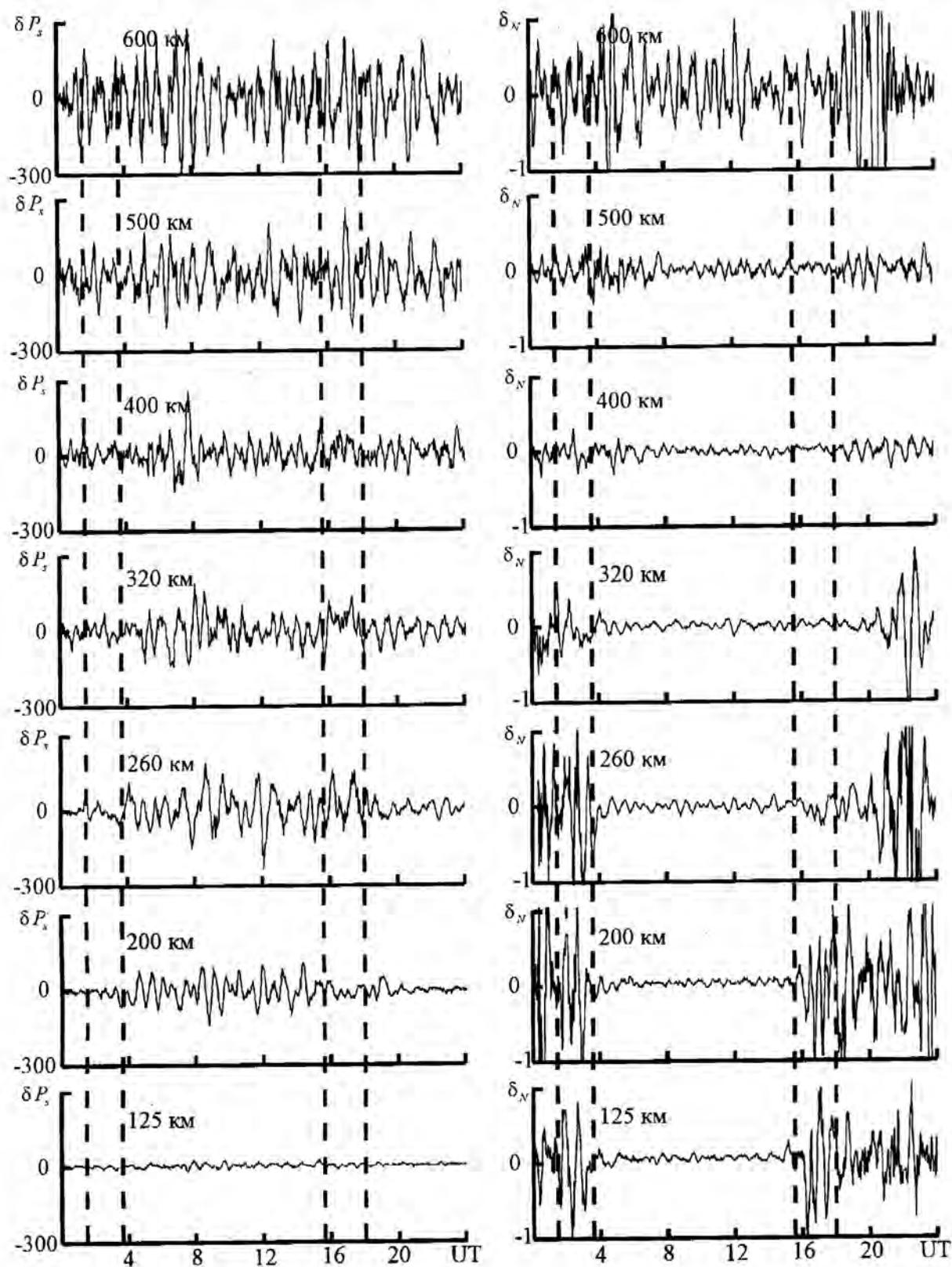


Рис. 7. То же для аномальной ионосферной бури 22 марта 2003 г.

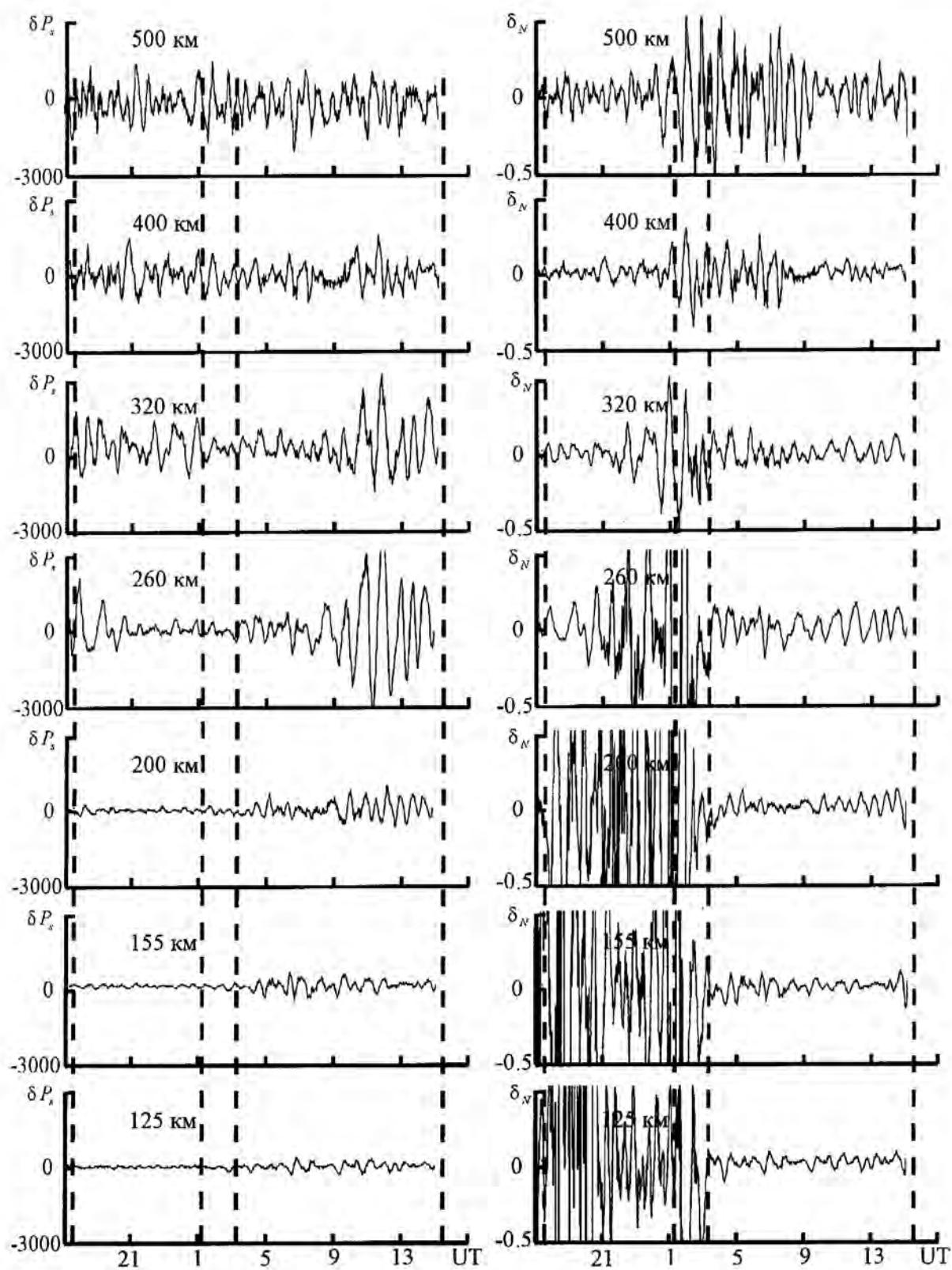


Рис. 8. То же для магнитной бури 24—25 сентября 1998 г.

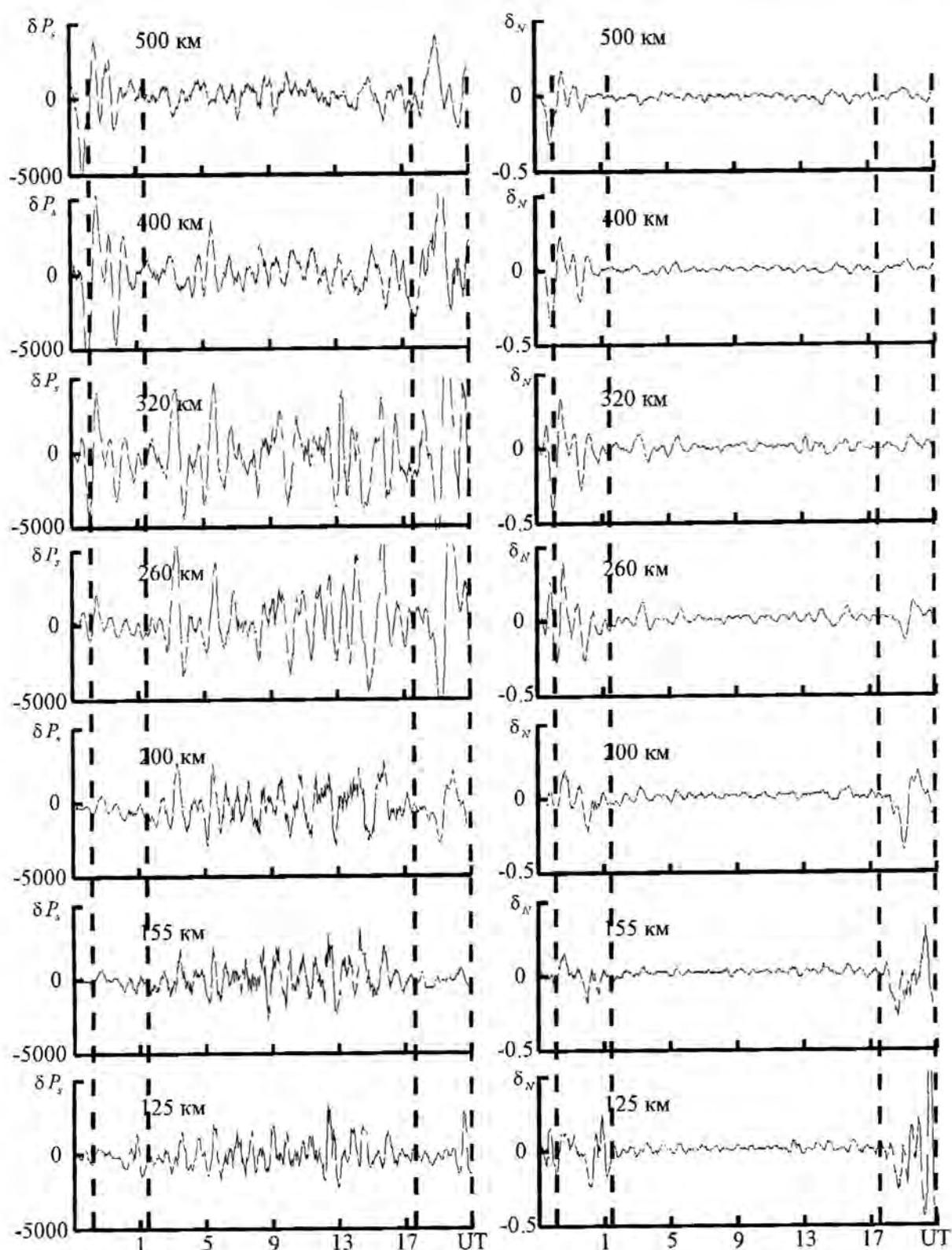


Рис. 9. То же для магнитной бури 29—30 мая 2003 г. (показаны моменты восхода и захода Солнца на высоте 350 км и на уровне Земли)

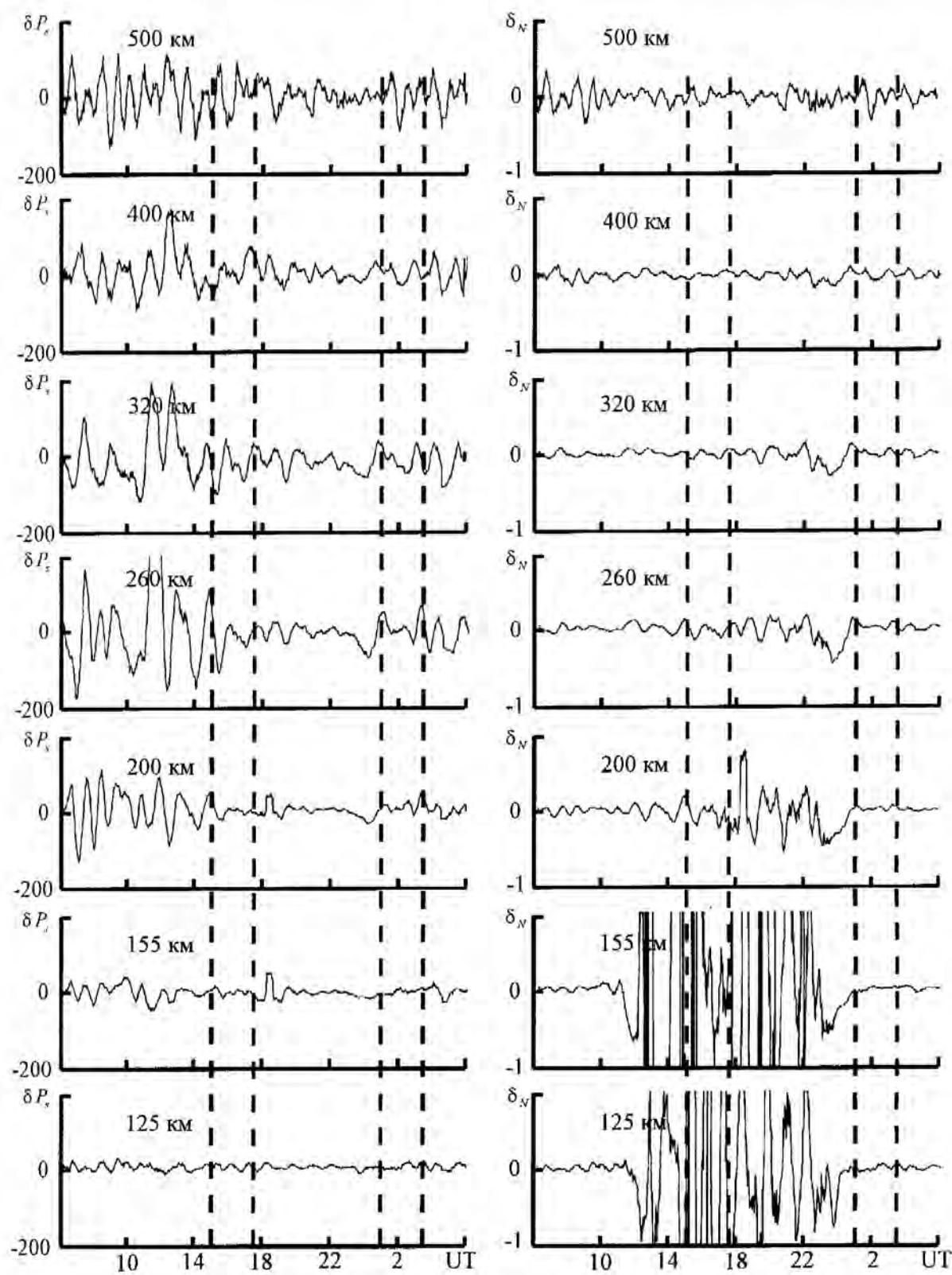


Рис. 10. То же для магнитной бури 2–3 октября 2002 г.

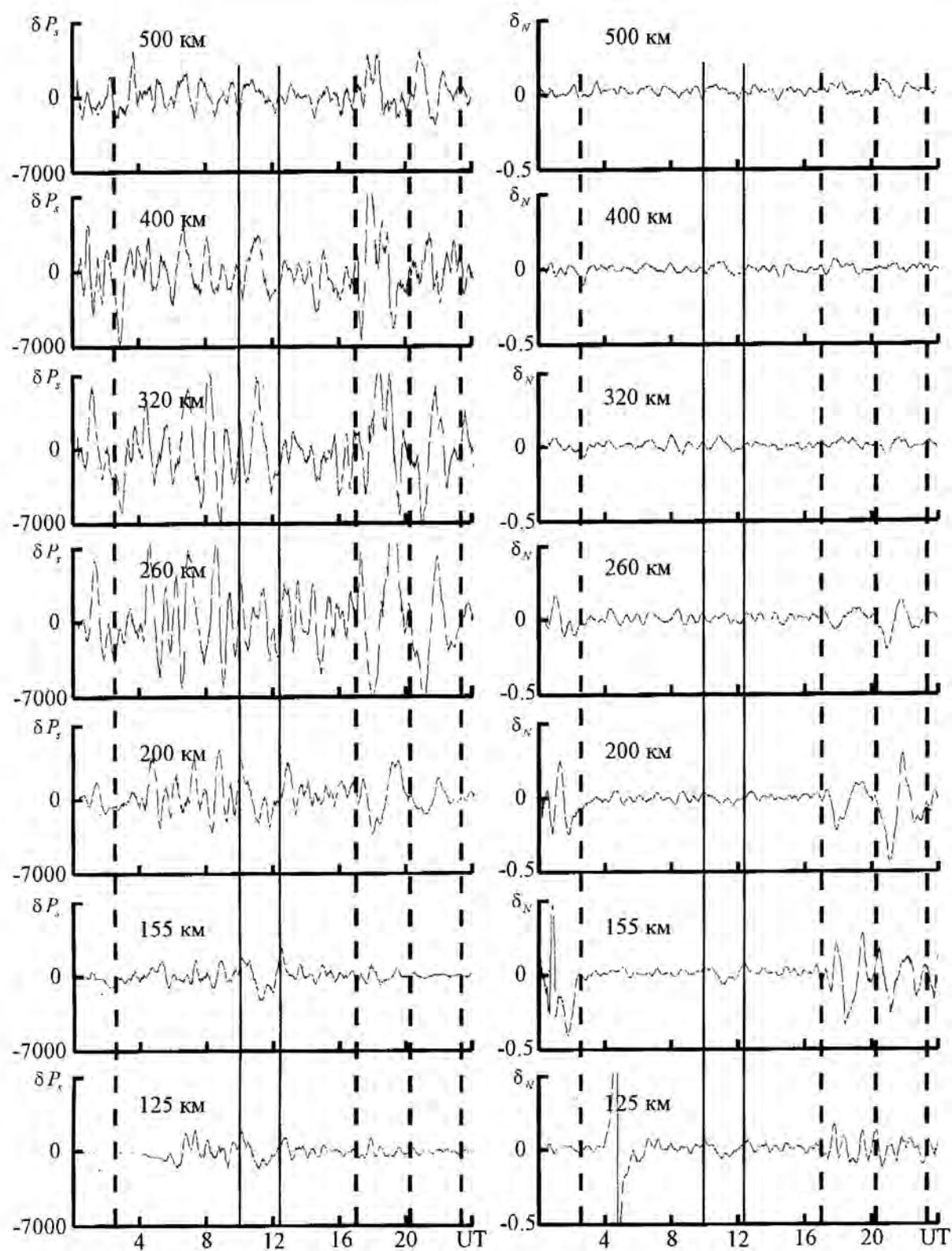


Рис. 11. То же для затмения Солнца 11 августа 1999 г. (сплошные вертикальные линии)

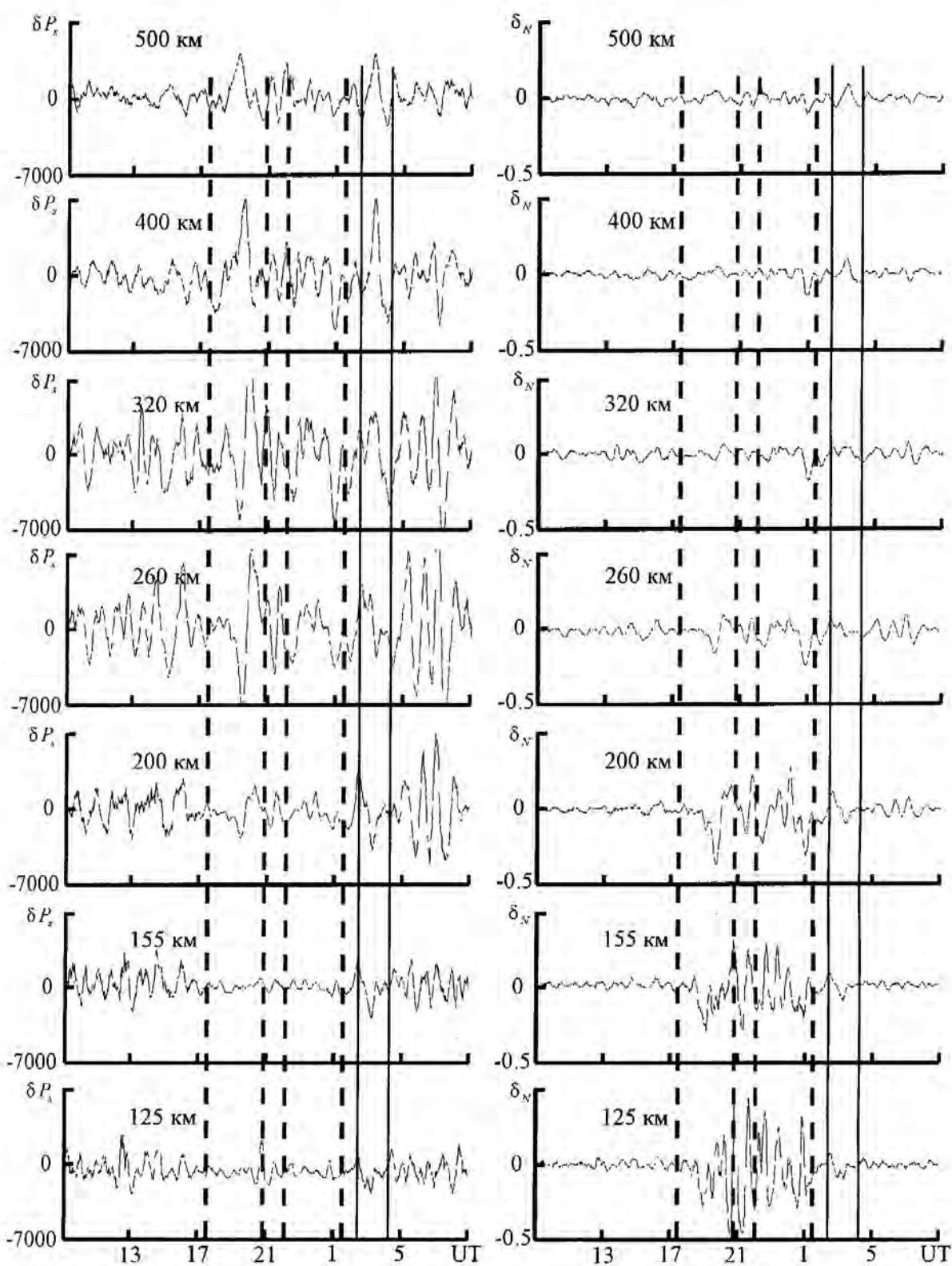


Рис. 12. То же для затмения Солнца 31 мая 2003 г. (сплошные вертикальные линии; моменты восхода и захода Солнца даны на высоте 350 км и на уровне Земли)

имела место 25 сентября 1998 г. [8, 10]. Вторая, сверхсильная ($K_p = 8$), буря наблюдалась 30 мая 2003 г. Для сравнения также привлечены результаты, полученные на спаде очень сильной ($K_p = 7$) магнитной бури (МБ), главная фаза которой фиксировалась 1 октября 2002 г.

Магнитная буря 25 сентября 1998 г. описана в работах [8, 10]. Внезапное начало бури имело место около 23 ч 24 сентября. Главная фаза наблюдалась в интервале времени с 01 до 10 ч 25 сентября. Затем наступила фаза восстановления.

В течение главной фазы и до конца наблюдений (15:00 25 сентября) имело место значительное уменьшение N на высотах до 500 км [10]. Это наложило определенный отпечаток на амплитуды ВВ. Опишем их подробнее.

Основной особенностью ВВ в период этой МБ была генерация своеобразного волнового пакета в интервале времени 9–15 ч, состоящего из 6–7 квазипериодов (рис. 8). Лучше всего он был выражен в диапазоне высот 250–350 км. На высотах $z < 320$ км значения T изменялись от 60 до 50 мин. На больших (340–500 км) высотах $T \approx 30$ –40 мин. Амплитуда ВВ при этом превышала ночные значения в 2–10 раз для $z = 125$ –320 км соответственно. Выше 400 км суточные вариации амплитуд были незначительными. Поведение относительных амплитуд δ_N было следующим. В волновом пакете $\delta_{N\max} \approx 15\%$ при $z = 125$ –300 км. В ночное время из-за низких значений N (а также q) относительные амплитуды ВВ δ_N , как обычно, сильно колебались и достигали значений, равных многим десяткам процентов. На высотах $z > 320$ км суточный ход был более плавным, колебания δ_N были менее выраженным. Вблизи восхода Солнца (00–03 ч), когда концентрация электронов была минимальной, значения δ_N увеличивались до 30–50 %. В остальное время на этих высотах $\delta_N = 10\%$.

Магнитная буря 30 мая 2003 г. описана в работе [11]. Здесь отметим лишь интервалы ее фаз. Внезапное начало бури зарегистрировано в 12:25 29 мая. Главная фаза имела место с 23 ч 29 мая до 03 ч 30 мая. Затем началась фаза восстановления, которая продолжалась до конца измерений (09 ч 31 мая).

Сначала опишем вариации $N(t)$. На высотах $z \leq 200$ км в суточном ходе имел место один максимум N . На больших высотах за 1–2 ч до местной полуночи наблюдался ночной максимум ионизации. Значения N в этих максимумах сравнялись при $z \approx 250$ км. На высотах $z > 250$ км значения N в ночном максимуме в 1.5–2 раза

превышали значения N в дневном максимуме.

ВВ наблюдались в течение всех суток 30 мая, а также 31 мая (рис. 9). Их амплитуды на высотах $z \leq 350$ км в дневное время были в 2–5 раз больше, чем в ночные время. Период преобладающего колебания при $z = 125$ –200 км составлял 40–45 мин, а при $z = 220$ –500 км он увеличился до 50–60 мин. На высотах $z = 300$ –500 км суточные вариации ΔN выражены слабее, чем на меньших высотах.

Амплитуды ВВ в дневное время увеличивались в диапазоне высот 125–250 км. Их максимальное значение наблюдалось на высотах 250–350 км. Выше они постепенно уменьшались и на высоте около 500 км были уже в 3–5 раз меньше, чем на высоте 250 км.

Относительные амплитуды в ночные время составляли 10–20 %, а в дневное они не превышали 5–10 %.

Магнитная буря 1–2 октября 2002 г. началась около 8 ч 30 сентября [15]. Главная фаза бури наблюдалась с 09 до 15 ч 1 октября. Фаза восстановления продолжалась до 3 октября.

Измерения выполнены с 10 ч 2 октября до 09 ч 3 октября. На высотах $z \approx 150$ –250 км максимум N в суточном ходе имел место вблизи местного полудня. На высотах $z \approx 250$ –400 км также выделялся вечерний максимум, отстоящий от дневного примерно на 5–6 ч. Его продолжительность составляла около 2 ч. В диапазоне высот 400–500 км в суточном ходе $N(t)$ проявлялись три максимума: вечерний, ночной и утренний (соответственно около 16, 21 и 09 ч).

Амплитуды ВВ увеличивались вблизи максимумов в суточном ходе $N(t)$ (рис. 10). С увеличением высоты от 123 до 250–300 км амплитуды увеличивались. Выше отмечалось их постепенное уменьшение. В диапазоне высот от 300–500 км амплитуды ВВ уменьшились примерно в 2 раза. Выше 500 км суточные вариации δ_P выражены слабо. На высотах 200–400 км хорошо видна реакция ВВ на прохождение вечернего терминатора: амплитуда ВВ увеличилась в 1.5–2 раза, существенно изменился их спектральный состав. Например, в диапазоне высот 200–400 км значение периода преобладающего колебания увеличилось также в 1.5–2 раза (от 60 до 100–120 мин).

Относительные амплитуды ВВ увеличивались при малых значениях N и достигали 50–80 % на высотах 200–120 км соответственно (см. рис. 10). Оценки δ_N на высотах $z < 150$ –160 км в ночные время имели неприемлемо большую погрешность. В диапазоне высот 200–500 км суточная зависимость $\delta_N(t)$ выражена слабо, здесь $\delta_N \approx 10\%$, $T = 60$ мин.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА

Рассмотрим изменения характера ВВ, вызванные затмением Солнца (ЗС). Результаты получены в течение двух последних частных затмений, имевших место вблизи г. Харькова.

Затмение Солнца 11 августа 1999 г. Данному затмению посвящена работа [1]. Основной особенностью описываемого события было то, что оно наблюдалось в спокойный день вскоре после местного полудня. Частное (73 %) затмение продолжалось с 09:57 до 12:29, максимальное покрытие диска Солнца отмечено в 11:13.

Суточный ход $N(t)$ был следующим. На высотах $z < 180$ км был выражен максимум N вблизи местного полудня. Выше постепенно усиливался второй, ночной, максимум. Он проявлялся за 2–4 ч до местной полночи. Значения N в максимумах сравнялись на высоте около 250 км. В диапазоне высот 350–600 также отчетливо наблюдался предвосходный максимум.

Поведение амплитуд ВВ было следующим. В дневное они нарастили до высоты $z \approx 300$ км, а затем медленно убывали и на высоте 650 км стали в 3–4 раза меньше, чем на высоте 300 км (рис. 11). При $z = 700$ –1000 км амплитуды с высотой практически не изменялись. На высотах 125–200 км ночные значения амплитуд были в 1.5–3 раза меньше дневных значений. На высотах 300–1000 км суточный ход $\Delta N(z)$ был выражен слабо. На всех высотах наблюдались периоды ВВ $T = 30$ –60 мин.

Относительные амплитуды на высотах $z = 125$ –300 км, напротив, были больше в ночное время, чем в дневное (см. рис. 11). Выше 300 км суточный ход $\delta_N(t)$ выражен слабо. При $z \approx 300$ –800 км $\delta_N(t) \approx 5$ –6 %, а при $z \approx 800$ –1000 км $\delta_N(t) \approx 10$ –20 %.

Вскоре после максимальной фазы ЗС на высотах 125–450 км произошло существенное изменение спектрального состава и амплитуд ВВ. Последние уменьшились в 2–3 раза. Продолжительность этого процесса составляла 5–6 ч.

Затмение Солнца 31 мая 2003 г. Данное затмение описано в [11]. Его основной особенностью было то, что оно наблюдалось вскоре после восхода Солнца на фоне релаксирующей МБ. Частное (около 73 %) ЗС имело место с 02:16 до 04:17. Максимальная фаза отмечалась в 03:14.

Затмение вызвало уменьшение N на всех высотах с 03 до 04 ч. Кроме того, заметно увеличилась амплитуда ВВ и изменился их спектральный состав (рис. 12). На высотах 125–320 км вскоре после ЗС

наблюдался волновой пакет длительностью около 3–4 ч и периодом около 60 мин (3–4 колебания). Амплитуда ВВ при этом была в несколько раз больше, чем в то же время 30 мая.

Относительные амплитуды ВВ в течение затмения и вскоре после него были сравнительно небольшими: от 5 до 10 %. Примерно такими же они были в это время и в контрольный день (30 мая).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованию ВВ в ионосфере посвящено большое количество теоретических, экспериментальных и обзорных работ [12, 16, 24, 25, 27–33]. Несмотря на это, состояние исследований ВВ в настоящее время оставляет желать лучшего.

Как уже отмечалось во введении, необходимо уточнить частоту возникновения ВВ, их амплитуды и другие характеристики. Целесообразно усовершенствовать методики выявления и идентификации ВВ с источниками этих возмущений, более детально изучить особенности генерации и распространения ВВ в условиях, приближающихся к реальным. При этом придется считаться с неоднородностью атмосферы и ионосферы не только по высоте, но и по горизонтали, с усложнением картины волноводного распространения ВВ, с ролью нелинейных эффектов, устойчивостью ВВ к малым пертурбациям. Необходимо также развить механизмы генерации ВВ, например, мощными процессами в литосфере, в нижней атмосфере (погодными фронтами, грозовыми облаками, конвективными процессами и т. д.). Появление ВВ в ионосфере, скорее всего, обусловлено не только генерацией и распространением ВГВ в нейтральной атмосфере, но и нестационарными процессами в магнитосфере и на Солнце, а также плазменными процессами (неустойчивостями) в ионосфере. Эти гипотезы требуют экспериментальной проверки.

Полученные в настоящей работе результаты позволят продвинуться в направлении лучшего понимания механизмов генерации и распространения ВВ.

Суточная зависимость. Обсудим вначале суточные вариации параметров ВВ. Прежде всего отметим, что ВВ наблюдались практически в любое время суток и на всех высотах (100–500 км, а в отдельных экспериментах вплоть до 1000 км). Их амплитуда, как правило, качественно отслеживала суточный ход электронной концентрации $N(t)$ в ионосфере, включая локальные максимумы в зависимости $N(t)$. В дневное время амплитуда ВВ была в 2–5 раз больше, чем в ночное время. Значение N при этом изменялось примерно на порядок.

Поэтому относительная амплитуда ВВ δ_N в ночное время была обычно в 2–5 раз больше, чем в дневное. Последнее имело место лишь в нижней части F-области ионосферы, т. е. на высотах $z < 300$ км. Здесь в дневное время $\delta_N \leq 20\%$, а в ночное — многие десятки процентов. Как правило, чем меньшим было значение N , тем большим было δ_N . К сожалению, при малых значениях N имели место и малые значения отношения сигнала/шум ($q \leq 0.1$). Поэтому с увеличением δ_N увеличивалась и ее неопределенность. Например, 22 марта 2003 г. на высоте 152 км $\delta_N = 70 \pm 30\%$, а на высоте 290 км — $25 \pm 6\%$. В верхней части F-области ионосферы (высоты от 300–400 до 500–550 км) суточные вариации $\delta_N(t)$ были слабыми.

Интересной является высотная зависимость амплитуды ВВ в дневное время. На высотах от 100–125 км до высот 200–300 км она увеличивалась в 5–20 раз. При $z \approx 200$ –300 км обычно наблюдались максимальные значения амплитуд ВВ. На больших высотах прослеживалось постепенное их уменьшение. При $z \approx 500$ км амплитуды ВВ были на порядок меньше, чем при $z \approx 200$ –300 км. При этом характерный масштаб убывания амплитуд (в e раз) составлял около 100 км.

Если бы высотный ход амплитуд ВВ в дневное время определялся только профилем $N(z)$, для которого максимум отмечается на высоте около 300 км, то и максимум амплитуд, по-видимому, наблюдался бы примерно на 300 км. В то же время последний проявляется на высотах 200–300 км. Скорее всего, высотная зависимость амплитуд ВВ определялась их волноводным характером распространения, а также физическими процессами, ответственными за формирование и диссиацию ΔN (см. об этом ниже). Эффективная толщина волновода и его высота составляли около 150–200 и 180–200 км соответственно.

Сезонная зависимость. ВВ наблюдались во все сезоны года. В зависимости от сезона характеристики ВВ изменялись лишь количественно. Относительно небольшой объем исходных данных не позволил установить сезонный ход характеристик ВВ. Можно утверждать, что высота волновода и его эффективная толщина не сильно изменялись в зависимости от времени года.

Во все сезоны амплитуда ВВ в дневное время была больше в 2–5 раз, чем в ночное время. Относительная амплитуда во все сезоны ночью была больше, чем днем.

Нижняя граница, начиная с которой суточные зависимости $\delta_N(t)$ были выражены слабо, изменялась существенно — примерно от 300 до 400 км.

Влияние солнечного терминатора. Влиянию солнечного терминатора (СТ) на параметры ионосферы посвящено большое количество работ [2, 17, 18]. Тем не менее, его роль изучена недостаточно, особенно в экспериментальном плане. В наших наблюдениях отмечалось, что после прохождения СТ изменялись амплитуды ВВ и их спектральный состав. Поскольку горизонтальная скорость ВВ, связанных с терминатором, обычно составляет $v = 100$ –300 м/с [13], а его скорость движения в средних широтах — около 350 м/с, ВВ могут существенно (на несколько часов) отставать от терминатора. При декременте затухания ВВ $3 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-3} км⁻¹ и $v = 200$ м/с продолжительность их наблюдения должна составлять 1.5–5 ч. Это означает, что утренний и вечерний терминаторы вместе способны поддерживать существование ВВ в течение времени от 3 до 10 ч. Эти оценки не противоречат нашим наблюдениям, а также результатам работы [13].

Опосредованное влияние на ВВ, по-видимому, оказывает магнито-сопряженный терминатор. Исследованию реакции ионосферы над Харьковом на прохождение магнитосопряженного терминатора посвящена работа [20].

Влияние затмений Солнца. ЗС напоминает наступление кратковременной (около 2–3 ч) ночи. Поэтому затмения, как и прохождение солнечного терминатора, сопровождаются изменением характера ВВ, при этом варьируются амплитуды и спектральный состав ВВ. Продолжительность реакции на ЗС достигала многих часов.

Волновые возмущения, сопровождавшие ионосферную бурю. Как уже отмечалось, ионосферная буря 20–21 марта 2003 г. была двухфазной. В течение положительной фазы, днем 20 марта, амплитуда ВВ была существенно больше, чем в последующие три дня. В период отрицательной фазы, т. е. 21 марта, амплитуды были заметно ниже, чем 20 марта. Можно утверждать, что амплитуды ΔN качественно отражали изменения N . Как известно, положительная и отрицательная бури сопровождаются соответственно ростом и падением N по сравнению с фоновым днем [9].

Поведение относительных амплитуд ВВ также существенно изменялось в зависимости от фазы ионосферной бури. Так, 20 марта, в период положительной фазы, значения δ_N были в 1.5–4 раза меньше, чем в последующие дни. В течение отрицательной фазы, напротив, наблюдалось увеличение в 2–3 раза значений δ_N , особенно в верхней части области F ионосферы. Здесь относительная амплитуда достигала 40–80 %.

Волновые возмущения, сопровождавшие магнитные бури. Магнитные, ионосферные и атмосферные бури представляют собой проявление единого процесса — геокосмической бури [23]. Последняя вызывается мощными нестационарными «порывами» солнечного ветра. Усилившиеся «порывы» сопровождаются инжекцией энергии и частиц в геокосмосферу [23]. В результате этого атмосфера нагревается, в термосфере существенно изменяется градиент температуры, усиливаются атмосферные ветры. В полярных областях (широта около $\pm 70^\circ$) генерируются ВВ, которые распространяются преимущественно к экватору.

Если нагрев атмосферы приводит к деформации «стенок» атмосферного (точнее термосферного) волновода и его высоты расположения, то вариации концентрации электронов в ионосфере обуславливают существенные изменения абсолютных и относительных амплитуд ВВ. Об этом свидетельствуют результаты моделирования и наблюдений.

Вариации характеристик ВВ, сопровождавших описанные выше МБ, отличались многообразием так же, как отличаются многообразием сами магнитные бури. Строго говоря, нет двух подобных МБ. Заметно изменялся спектральный состав ВВ, однако периоды преобладающих колебаний находились в пределах 30—120 мин.

Характеристики волновых возмущений. Как уже отмечалось, основными характеристиками ВВ являются частота их появляемости, периоды, длины волн в горизонтальной λ_x и вертикальной λ_z плоскостях, проекции скоростей v_{xz} , распространения, амплитуды и др.

Как оказалось, ВВ в диапазоне периодов 30—60 мин наблюдались практически всегда и на всех высотах (100—500 км). Их максимальная амплитуда изменялась в пределах 10^{10} — 10^{11} м $^{-3}$, а относительная амплитуда — от единиц до многих десятков процентов. Высотный ход ΔN и δ_N часто был немонотонным. При этом на высотах $z \approx 200$ —300 км имели место максимумы в зависимостях $\Delta N(z)$ и $\delta_N(z)$, причина появления которых обсуждается далее. Основные параметры термосферного волновода такие: высота была около 200 км, а его эффективная толщина составляла 150—200 км.

На высотах $z \leq 200$ —250 км время появления одного и того же пакета ВВ обычно зависело от значения z : на меньших высотах пакет появлялся позже, чем на больших. При разности высот Δz_p в 20 км время запаздывания Δt_p в спокойных условиях изменялось в пределах 10—20 мин, что соответствовало $v_z = \Delta z_p / \Delta t_p \approx 17$ —34 м/с. При $T \approx 30$ —60 мин значения $\lambda_z = 30$ —120 км. В течение МБ

25 сентября $\Delta t_p = 3$ —5 мин и $v_z \approx 90$ —60 м/с. При $T \approx 60$ мин имеем $\lambda_z \approx 320$ —220 км.

При исследовании естественных ВВ не удавалось определить v_x и λ_x , так как неизвестно было место генерации этих возмущений. Их можно вычислить, если учесть, что при $\lambda_z^2 \ll \lambda_x^2$ и $\lambda_z \ll H$ ($H = 30$ —50 км — приведенная высота атмосферы на высотах термосферы) $\lambda_x = \lambda_z T / T_B$ [6], где $T_B \approx 15$ мин — период Брента—Вайсяля. Например, при $v_z = 90$ м/с, $T = 60$ мин имеем $\lambda_x = 1280$ км. Для проекций групповых и фазовых скоростей при этом справедливы соотношения [6]

$$v_{gx} = -v_{gz} \frac{T}{T_B}, \quad v_x = v_z \frac{T_B}{T}.$$

При тех же значениях T и v_z имеем $v_x \approx 22$ м/с, $v_{gx} \approx 360$ м/с.

Амплитуды волновых возмущений. Амплитуда ВВ зависит от их природы. Периоды $T \geq 15$ мин могут иметь медленные МГД, магнитоградиентные и гравитационные волны. Два первых типа волн так или иначе связаны с плазменными процессами, а третий тип — с процессами в нейтральной атмосфере. По-видимому, волны с периодами более 15 мин чаще всего обусловлены генерацией и распространением гравитационных волн. Именно они через столкновения с нейтралами «навязывают» волновые движения ионизированному компоненту атмосферы на высотах F-области ионосферы. Рассмотрим это подробнее.

Для ионосферы на высотах 100—500 км, где применимо квазигидродинамическое описание плазмы с учетом соударений электронов с ионами, рекомбинационных процессов и произвольной зависимости приведенной высоты атмосферы $H(z)$, следуя работе [6], можно получить такие уравнения для δ_N

$$\delta_N = \frac{|K_z| u_{zm}}{|\omega|} e^{\zeta/2} = \delta_{N0} e^{\zeta/2}, \quad z < 200 \text{ км}, \quad (1)$$

$$\delta_N = \frac{2\Theta H u_{zm}}{D_0} \sqrt{\frac{\kappa^2 + 1}{F_1(\kappa)}} e^{-\zeta/2}, \quad z > 200 \text{ км}, \quad (2)$$

$$K_z = k_z - i/(2H), \quad \tilde{\omega} = -i\omega_{N0} + \omega, \quad \omega_{N0} = t_{N0}^{-1}$$

$$D_0 = D|_{\zeta=0}, \quad \Theta = H_p/H, \quad \kappa = 2k_z H,$$

$$F_1(\kappa) = \Theta^2 \kappa^4 + 2(\Theta^2 + 2\Theta + 2)\kappa^2 + (6 - \Theta)^2,$$

$$\zeta = \int_0^z dz/H(z),$$

где k_z — проекция волнового вектора, ω — частота волны, u_{zm} — амплитуда проекции скорости частиц

в волне, $H_v = k(T_e + T_i)/(m_i g)$, k — постоянная Больцмана, $T_{e,i}$ — температуры электронов и ионов, m_i — масса ионов, g — ускорение свободного падения, D — коэффициент амбиполярной диффузии, t_{N0} — время становления N за счет рекомбинации.

Из выражений (1) и (2) видно, что в нижней части F-области $\delta_N \propto e^{z/2}$, а в верхней $\delta_N \propto e^{-z/2}$. На высоте около 200 км δ_N достигает своего максимального значения. На малых высотах сохраняется плотность кинетической энергии в волне, и $\delta_N \propto \omega u_{zm} \propto e^{z/2}$. На больших высотах роль диффузии становится определяющей ($D_0 \propto e^z$), поэтому здесь $\delta_N \propto e^{-z/2}$. В одних случаях такое поведение $\delta_N(z)$ качественно согласуется с приведенными выше результатами наблюдений. В других случаях высотная зависимость амплитуд ВВ была иной. Различие могло быть связано с более сложной картиной волноводного распространения ВВ, горизонтальной неоднородностью среды, влиянием нелинейных эффектов, неустойчивостью ВВ к малым пертурбациям и т. п.

выводы

1. Показано, что ВВ в ионосфере есть практически всегда, при любых состояниях космической погоды. Воздействие источников энерговыделения и вариации состояния космической погоды приводят к изменению характера ВВ, их спектрального состава и амплитуды.

2. В дневных условиях в нижней части F-области ионосферы (до 200, а иногда 300 км) амплитуды ВВ обычно увеличивались с увеличением высоты. В ночных условиях подобный эффект уверенно не наблюдался. В ночное время на этих высотах амплитуда ВВ в 2–10 раз меньше, чем в дневное время.

В дневных условиях в верхней части F-области ионосферы (высоты от 200–300 до 500 км) амплитуды ВВ постепенно уменьшаются на порядок при увеличении высоты от 200–300 до 500 км.

3. Относительные амплитуды ВВ δ_N в нижней части F-области ионосферы в ночное время превышали дневные значения и достигали десятков процентов. При этом, однако, увеличивалась и погрешность оценки δ_N . Это было обусловлено низкими значениями N и отношения сигнала/шума.

4. Существенная высотная зависимость амплитуд ВВ, с одной стороны, отражает высотный ход регулярных профилей электронной концентрации. С другой стороны, эта зависимость, по-видимому,

свидетельствует в пользу волноводного распространения ВВ с периодами 30–120 мин. Центр атмосферного волновода обычно располагался на высоте около 200 км. Эффективная толщина волновода изменялась в пределах 150–200 км.

5. Теоретические расчеты и оценки показали, что на высотах 125–170 км должно иметь место экспоненциальное увеличение (с постепенно увеличивающимся от 25 до 60 км масштабом) относительных амплитуд ВВ, вызванное увеличением амплитуды возмущающей силы. Последнее обусловлено сохранением плотности кинетической энергии ВГВ. На высотах около 180–200 км относительная амплитуда должна достигать своего максимального значения. Выше она должна убывать также по экспоненциальному закону с масштабом около 100 км. Такое поведение обусловлено увеличением роли амбиполярной диффузии по мере увеличения высоты от 200 до 400 км.

Результаты наблюдений и расчетов в ряде случаев хорошо соответствовали друг другу. В целом же высотная зависимость ВВ более сложная, чем это следует из описанной выше простой теоретической модели.

1. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25–63.
2. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш. Дробежев В. И. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1988. — 24, № 2. — С. 134–143.
3. 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.
4. 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.
5. Волновые возмущения в ионосфере. — Алма-Ата, 1987. — 122 с.
6. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М., 1974. — 256 с.
7. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М., 1978.
8. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — 43, № 6. — С. 770–787.
9. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 4–12.
10. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И. Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную

- бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57—94.
11. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 г. // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12—25.
 12. Григорьев Г. С., Чунчузов Е. П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере // Полярные сияния и свечения ночных неба. — М. 1975.—№ 23.—С. 5—21.
 13. Иванов В. П., Карвецкий В. Л., Коренькова Н. А. Структура и динамика перемещающихся волнообразных возмущений по данным доплеровского зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 1.—С. 109—114.
 14. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. — Новосибирск, 1979.
 15. Пазюра С. А., Черняк Ю. В. Процессы в околоземном космосе, сопровождавшие магнитную бурю 1 октября 2002 года // Вестник нац. технического ун-та (ХПИ).—2003.—4, вып. 7.—С. 77—80.
 16. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика.—1977.—20, № 12.—С. 1773—1789.
 17. Сомников В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31, № 1.—С. 1—12.
 18. Сомников В. М., Троицкий Б. В. Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия.—1975.—15, № 5.—С. 856—860.
 19. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М., 1982.—136 с.
 20. Таран В. И. Эффекты магнитосопряженной точки, наблюдаемые в Харькове // Ионосфер. исслед.—1979.—№ 27.—С. 81—85.
 21. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественных и искусственно возмущенных состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
 22. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
 23. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
 24. Шашунькина В. М. Гравитационные волны в области F ионосферы // Ионосфер. исслед.—1972.—№ 21.—С. 154—162.
 25. Afraimovich E. L., Palamarchuk K. S., Perevalova N. P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmos. Terr.-Solar. Phys.—1998.—60.—P. 1205—1223.
 26. Beer T. Atmospheric waves. — N. Y., Toronto, 1974.
 27. Francis S. H. A Theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res.—1974.—79, N 34.—P. 5245—5260.
 28. Galushko V. G., Paznukhov V. V., Yampolski Y. M., Foster J. C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator // Ann. Geophys.—1998.—16.—P. 821—827.
 29. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophys.—1996.—14.—P. 917—940.
 30. Hunsucker R. D. AGWs generated in the high-latitude ionosphere: a review // Rev. Geophys. Space Phys.—1982.—20.—P. 293—315.
 31. Tolstoy I. Long-period gravity waves in the atmosphere // J. Geophys. Res.—1967.—72, N 18.—P. 4605—4622.
 32. Tolstoy I., Herron T. J. Atmospheric gravity waves from nuclear explosions // J. Atmos. Sci.—1970.—27.—P. 55—61.
 33. Williams P. J. S. Tides, atmospheric gravity waves and travelling disturbances in the ionosphere // Modern ionospheric science. A collection of articles published on the occasion of the anniversary: «50 years of ionospheric research in Lindau». — 1996.—P. 136—180.
 34. Yen K. S., Liu C. H. Theory of ionospheric waves. — N. Y., London, 1972.—376 p.

OBSERVATION DATA ON WAVE-LIKE PROCESSES IN IONOSPHERE UNDER QUIET AND DISTURBED CONDITIONS

V. P. Burmaka, V. N. Lysenko, L. F. Chernogor

Wave-like disturbances (WLDs) with periods of 30—120 min over an altitude range from 125 to 500 km (in some experiments from 100 to 1000 km) are studied. Measurements of common duration more than 400 h are carried out under various conditions of space weather (in conditions of quiet ionosphere, during magnetic and ionospheric storms, during two eclipses of the Sun). It is shown that WLDs in the ionosphere exist practically constantly. The action of natural or artificial sources of energy produces changes in WLDs character, their spectral structure and amplitude variations. The amplitudes vary significantly during a day depending on space weather conditions. The relative amplitudes of WLDs change from units up to many ten percents.

УДК 550.520.2

Є. В. Мартиш^{1,2}, О. М. Радченко¹, В. С. Сидоренко¹, В. О. Яценко²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

Акустична діагностика гетерофазної плазми

Надійшла до редакції 10.12.04

Аналіз робіт з експериментів та теорії розповсюдження акустичних хвиль в гетерофазному газодиполів висловлює твердження про доцільність застосування акустичної діагностики в запорошенні плазмі. Досліджені особливості таких систем та їхній вплив на дисперсійні рівняння для них. Наведені оцінки для амплітудно-фазових характеристик коливань акустичного типу, що необхідні для діагностики.

ВСТУП

У роботі [1] розглянуто методику застосування акустичної діагностики для запорошеної плазми. Вперше такий метод був запропонований для дослідження явища нуклеації в технології нанесення плівок за допомогою PECVD-процесів (осадження з хімічно реагуючої пари, підсилене плазмовими процесами). Зрозуміло, що явище нуклеації і подальше осадження забруднюючих частинок на плівку суттєво впливає на якість кінцевого продукту. Повної картини цього процесу немає і досі. Головні перепони полягають в труднощах визначення розмірів мікрочастинок (МЧ) у фазі нуклеації. Відомі недоліки мас-спектрометрії та лазерних методів вивчення розсіювання M_i [3] не дозволяють провести більш-менш точну діагностику розмірів макрочастинок.

Однак в роботах [1, 3] було доведено, що наявність полідисперсного пилу з відповідною функцією розподілу по розмірах впливає на загасання та швидкість поширення плазмових хвиль. Зокрема, в роботі [5] показано, що загасання Ландау домінує лише в області високочастотних хвиль, а низькочастотні можуть суттєво загасати завдяки, наприклад, процесам заряджання пилу. Тому вивчення поширення пилових акустичних хвиль (DAW) може слугувати для відповідної діагностики. Такі хвилі спостерігались в лабораторних умовах, і була відпрацьована методика вимірювання параметрів акустичних хвиль в запорошенні плазмі. Крім того, останнім часом підвищився інтерес до позаземної

запорошеної плазми (наприклад, кільця Сатурна). Раніше були зроблені спроби теоретично вивчити її параметри, пропонувались спостереження за швидкими МЧ та формуванням відповідного конуса Маха. Такий аналіз, на думку авторів, дозволить отримати суттєві результати про розвиток планетарних кілець.

На відміну від реагуючої плазми, де розмір МЧ, що виникли завдяки нуклеації плазмових частинок, порівняно малий, у позаземній плазмі можуть існувати частинки конденсованої фази довільних розмірів. Характер відповідної функції розподілу, як правило, степеневий, але є велика різниця між мінімальним та максимальним розміром [7]. На жаль, сьогодні дуже мало відомо про розмір порошинок та розподіл мас ззовні Сонячної системи, тому теоретичні оцінки важко порівнювати у таких цікавих об'єктах, як міжзоряні молекулярні пилові хмари.

Проте саме системи такого типу слугують прикладом впливу сил самогравітації, який абсолютно не характерний для звичайної плазми. Нижче буде показано, що деякі унікальні властивості запорошеної плазми з самогравітацією мають своє походження в особливостях розподілу порошинок по розмірах. Інтерес до космічної та технологічної плазми додатково збільшується також можливістю формування витягнутих порошинок, які мають власний дипольний момент (так звані «палички» — «rods»). Особливості електродинаміки та дисперсійні властивості запорошеної плазми з домішками електричних диполів розглянуті в роботі [4], але

фазові залежності, необхідні для застосування акустичної діагностики в таких системах, необхідно розглянути окремо.

ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ В ПЛАЗМІ ПРИ НАЯВНОСТІ ФУНКІЙ РОЗПОДІЛУ МІКРОЧАСТИНОК ПО РОЗМІРАХ

Розглянемо основні результати роботи [3], де розглядалась технологія отримання плівки аморфного кремнію з високочастотного розряду в силані. Експериментально виявлено, що розмір порошинок залишається монодисперсним під час нуклеації. Заряд порошинок невеликий, але велика їхня частина виявилась зарядженою. Зрозуміло, що в таких умовах густина електронного компонента мала, так що концентрація іонів приблизно дорівнює концентрації МЧ. Крім того, збудження пилових акустичних хвиль потребує врахування теплового руху МЧ у відповідному рівнянні, а їхня мала частота означає можливість нехтування динамікою електронів. Від традиційного дисперсійного рівняння для пилових акустичних хвиль в запорошенні пlasми (за умови врахування втрати імпульсу при русі МЧ внаслідок зіткнень) залишається такий вираз:

$$\omega(\omega + i\nu_d) \sim [T_i/M_d + \gamma_d T_d/M_d] k^2, \quad (1)$$

де ν_d — частота релаксації імпульсу для МЧ, λ — радіус Дебая для іонів (i) та МЧ (d), γ_d — показник адіабати для МЧ, v_{Td} — теплова швидкість МЧ, T_i та T_d — відповідні температури іонів (i) та МЧ (d), k — комплексний хвильовий вектор.

Розв'язок цього рівняння показує, що швидкість поширення акустичної хвилі приблизно збігається з виразом у квадратних дужках, а уявна складова частоти, пов'язана із загасанням, пропорційна частоті ν_d . Таким чином, при використанні акустичної діагностики для контролю в реальному часі маси та розмірів МЧ можна використати дисперсію пилових акустичних хвиль для фіксованої частоти та розміру МЧ як параметра. В (1) теплова швидкість і частота релаксації (зіткнень) є функціями розміру МЧ. Перша — через масу МЧ, а остання — через масу і поперечник МЧ. Співвідношення між масою МЧ та її розміром специфічне для порошинок у PEVCD-системі. Зауважимо, що рівняння (1) не містить опису процесів, що мають зв'язок із флюктуаціями заряду МЧ. Звичайно такі флюктуації розглядають як додатковий дисипативний механізм, але при скінченній амплітуді звукових хвиль можливе формування нестійкості [2]. Аналіз впливу такого нелінійного ефекту (пропорційного квад-

рату амплітуди хвилі) на акустичну діагностику запорошеної пlasми виходить за межі цієї роботи.

Врахування наявності розподілу по розмірах можна провести в кінетичному наближенні. Для цього представимо поздовжну діелектричну проникність запорошеної пlasми у вигляді суми доданків від кожної з компонент (електрони, іони, МЧ):

$$\epsilon_l = \epsilon_e + \epsilon_i + \epsilon_d. \quad (2)$$

Вирази для внесків від електронів та іонів є стандартними, а для МЧ буде враховано наявність степеневого розподілу по розмірах. Вважаємо, що всі МЧ сфероподібними, тоді радіус a такої сфери є змінною розподілу з показником μ .

Тоді заряд та маса МЧ с функціями її радіуса. Маса просто пропорційна об'єму, а заряд знаходить з таких міркувань, що всі МЧ мають одинаковий поверхневий потенціал U , тобто $q_d = aU$. Остаточно маємо

$$\begin{aligned} \epsilon_l(\omega, k) = 1 &+ \frac{4\pi}{k^2} \sum_a \frac{q_a}{m_a} \int \frac{k(\nabla f_{a0})}{\omega - kv} dv + \\ &+ \frac{4\pi}{k^2} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{q_d(a)}{m_d(a)} da \int \frac{k(\nabla f_{d0})}{\omega - kv} dv, \end{aligned} \quad (3)$$

де індекс $a = e, i$ (електрони та іони).

Далі у припущені максвеллівських функцій $f_{a0}(v)f_{d0}(v)$ всіх компонентів запорошеної пlasми можна виконати інтегрування (3) в спеціальних функціях (інтеграл ймовірності або функція Крампа). Потім потрібно використати їхню асимптотику для малих і великих аргументів, маючи на увазі відому умову на фазову швидкість пилових акустичних хвиль $v_{Td} \ll \omega/k \ll v_{Ta}$. Однак отримані вирази все одно дуже громіздкі. Реальне спрощення полягає у використанні умови $a_{\min} \ll a_{\max}$ та $\mu > 1$, які добре виконуються в космічних умовах. Тоді вираз (3) виглядає таким чином:

$$\begin{aligned} \epsilon_l = 1 &+ k_e^2/k^2 + k_i^2/k^2 - \omega_d^2/\omega^2 \times \\ &\times \frac{1}{\mu} \left[1 + \frac{3}{3 + \mu} \frac{T_d}{m_d(a_{\min})} \left(\frac{k}{\omega} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут k_a^2 — обернені квадрати радіусів Дебая частинок сорту a . Можна показати, що у припущені монорозмірного пилу, коли всі вирази, які містять тільки μ , дорівнюють одиниці, вираз для фазової швидкості пилової акустичної хвилі збігається з тим, який отриманий з (1). Параметри ж степеневого розподілу по розмірах $n_d(a) = C_d a^{-\mu}$ можна знайти, вимірюючи, у відповідності з роботою [1], фазову швидкість та коефіцієнт загасання.

ФАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИЛОВИХ АКУСТИЧНИХ ХВІЛЬ У ПЛАЗМІ З ДИПОЛЬНИМИ ДОМІШКАМИ

Загальновідомо, що формування «паличок» може відбуватися внаслідок коагуляції частинок плазми (нейтральних чи заряджених). Вони мають можливість обертатися завдяки взаємодії з плазмовим оточенням, тобто зіткненням з плазмовими частинками та/або взаємодії з електричним полем колективних рухів плазми. В решті властивостей такі «палички» подібні до сферичних МЧ: вони також можуть утворювати квазікристалічні структури та левітувати у зіткнівальних плазмових прошарках [6].

Низькочастотні дисперсійні властивості запорошеної плазми, що залежать від трансляційних ступенів волі, вивчались неодноразово [7]. Спираючись на ці результати, можна, як це зроблено в роботі [4], знайти внесок «паличок» з дипольним моментом d і зарядом q до діелектричної проникності запорошеної плазми. Власний дипольний момент може виникати у МЧ завдяки неоднорідному розподілу електричного заряду вздовж «палички». Така задача вирішується у два етапи. На першому знаходиться поляризовність запорошеної плазми з урахуванням дипольної складової, а за нею — діелектрична проникність. Другий етап полягає у знаходженні дисперсійних властивостей системи.

Поляризовність такої системи можна отримати, використавши деякі квантовомеханічні результати. Саме ізольований жорсткий ротатор з його власним дипольним моментом моделюється квантовою системою. Незбурені хвильові функції її добре відомі. Оператор збурення виводиться з виразу для енергії, що набуває такий диполь в електричному полі хвилі. Вираз для середнього значення дипольного момента в певному квантовому стані, що індукований електромагнітним зовнішнім полем, відомий. Він отриманий у першому порядку теорії збурень саме в довгохвильовому наближенні. За відомим правилом відбору та енергетичним спектром ротатора були отримані відповідні матричні елементи. Користуючись ними, можна підсумувати по одному з квантових чисел (азимутальному) і отримати наступний вираз для z -складової індукованого моменту d_z :

$$d_z^* = \frac{d^2}{3J} \left[\frac{(l+1)^2}{\hbar^2(l+1)^2 - \omega^2} - \frac{l^2}{\hbar^2 l^2 - \omega^2} \right] \tilde{E}_z, \quad (5)$$

Такий вираз дозволяє знайти тензор поляризованості індивідуального ротатора:

$$d_z^* = \alpha_{zz}^l(\omega) \tilde{E}_z.$$

Враховуючи симетрію системи

$$\alpha_{xx}^l(\omega) = \alpha_{yy}^l(\omega) = \alpha_{zz}^l(\omega) \equiv \alpha^l(\omega),$$

остаточно отримуємо

$$\alpha^l(\omega) = \frac{d^2}{3J} \left[\frac{(l+1)^2}{\hbar^2(l+1)^2 - \omega^2} - \frac{l^2}{\hbar^2 l^2 - \omega^2} \right]. \quad (6)$$

Сумування по орбітальному квантовому числу l не є тривіальною задачею. Крім того, треба виконати усереднення по всіх квантових станах. Ця задача вирішена в роботі [4] у квазікласичному наближенні:

$$\alpha(\omega) = \frac{d^2}{3T} \int_0^\infty \frac{x \exp(-x^2) dx}{x^2 - y^2}, \quad (7)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\omega}{\omega_T}.$$

Тут $x = \hbar l / \sqrt{2JT}$, а $\omega_T = \sqrt{T/J}$ — величина, пропорційна кутовій швидкості ротатора. Для частот $\omega \gg \omega_T$ інтегрування можна виконати, розкладаючи у степеневий ряд за степенями $x^2/y^2 \ll 1$, тоді

$$\text{Re}\alpha(\omega) \approx - \frac{d^2}{3J\omega^2} \left[1 + 2 \frac{\omega_T^2}{\omega^2} \right]. \quad (8)$$

Коли ж $\omega \ll \omega_T$, то слід очікувати переходу диполів до теплової рівноваги (бо характерний час є великим). Тоді їхній розподіл відповідає бульманівському для диполів у постійному електричному полі. Можна стверджувати, що тоді поляризовність α не залежить від частоти ω і дорівнює статичній ланжевенівській:

$$\alpha(\omega) \approx d^2/(3T). \quad (9)$$

Тепер можна розглянути поздовжню діелектричну проникність ϵ запорошеної дипольної плазми. Останню можна представити у вигляді суми внесків відповідного зарядженого компонента — електронів ϵ_e , іонів ϵ_i , заряджених МЧ ϵ_d та їхніх дипольних моментів:

$$\epsilon_l = \epsilon_e + \epsilon_i + \epsilon_d + 4\pi N_d \alpha(\omega), \quad (10)$$

де N_d є густинна гранул a поляризовність $\alpha(\omega)$ дається виразом (7). Аналітичні вирази для діелектричних проникностей електронів, іонів та заряджених гранул добре відомі. Далі будемо розглядати лише низькочастотні коливання, асоційовані з обертальним рухом дипольних моментів. Зауважимо, що такий рух в певному сенсі швидший, ніж поступальний. Тому буде справедливим припущення щодо теплової рівноваги обертальних степенів

руху з поступальними з однією температурою T . Дійсно, роторатора, який рухається з тепловою швидкістю v_T , за характерний час обертання переміщується на відстань порядку розміру МЧ: $v_T/\omega_T = a$. При більших частотах положення центру мас практично не змінюється. Іншими словами, МЧ для таких частот практично перебувають у спокої. Використовуючи відому умову

$$\epsilon(\omega, k) = 0,$$

можна проаналізувати низькочастотні коливання запорошеної плазми з урахуванням дипольних моментів МЧ. Останні дають незначний зсув у частотах відомих власних коливань відповідної електрон-іонної плазми. Але вони можуть відігравати суттєву роль у беззіткновальному загасанні плазмових коливань. Це відбувається завдяки тому, що таке загасання взагалі не залежить від хвильового вектора (декремент загасання $\gamma = \exp(-\omega^2/\omega_T^2)$). Таким чином, власні коливання електрон-іонної плазми можуть бути подавлені при додаванні відповідної кількості МЧ з дипольним моментом при частотах, що близькі до частоти теплового обертання ω_T .

Можна розглянути і особливий тип власних слабко загасаючих коливань у такій плазмі. Для цього розглянемо частотний діапазон $\omega_T \ll \omega \ll kv_{Ti}$ (k — хвильовий вектор, v_{Ti} — теплова швидкість іонів). У цій області частот дисперсійне рівняння має вигляд

$$1 + \sum_a \frac{1}{(ka_a)^2} \left[1 + i \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega}{kv_{Ti}} \right] - \frac{\Omega_d^2}{\omega^2} - \frac{\Omega_d^2}{\omega^2} = 0, \quad (11)$$

де

$$\Omega_d = \sqrt{\frac{4\pi Z^2 e^2 N_d}{m_d}}, \quad \Omega_d = \sqrt{\frac{4\pi d^2 N_d}{3J}},$$

$$a_d = \sqrt{\frac{T_a}{4\pi e^2 N_d}}, \quad v_{Ti} = \sqrt{\frac{T_a}{m_a}};$$

а відмічає електронний та іонний компоненти. Умову квазінейтральності можна записати у вигляді

$$N_i = N_e + ZN_d,$$

де Z — кількість електронів на МЧ. Відділяючи дійсну частину, можна отримати дисперсію низькочастотних поздовжніх коливань у запорошенні плазмі з урахуванням дипольних моментів МЧ. Але і це співвідношення у загальному випадку досить складне. Його можна спростити, якщо вважати, що всі електрони осіли на МЧ, тобто плазма фактично є двокомпонентною. Тоді в довгохвильовому набли-

женні $ka_i \ll 1$ вираз (11) дас

$$\omega = k \sqrt{\left[1 + \frac{m_d d^2}{3J e^2 Z^2} \right] \frac{Z^2 T_i}{m_d}}, \quad (12)$$

Оцінки показують, що швидкість відповідних пилових акустичних хвиль для дипольної запорошеної плазми з МЧ у вигляді «паличок» приблизно у $\sqrt{5}$ разів вища, ніж для сферично-симетричних диполів. Нагадаємо, що такі хвилі слабко загасають лише при $\omega \gg \omega_T$. У протилежному випадку вони подавляються за рахунок взаємодії електричного поля хвилі з диполями, які обертаються. При існуванні розподілу МЧ по довжині залежними від нього, як видно з (12), залишаються лише заряд МЧ та її маса. На жаль, у більшості експериментальних робіт досліджують спеціально виготовлені монорозмірні дипольні МЧ, тому чисельні оцінки порівнювати складно.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАПОРОШЕНОЇ ПЛАЗМИ З САМОГРАВІАЦІЄЮ

Одним з ефектів, який відрізняє властивості запорошеної плазми від звичайної електрон-іонної, є вплив сил гравітації. Для важких МЧ ці сили можуть бути порівняні з електромагнітними, тим більше в космічних умовах заряд МЧ може бути порівняно невеликим. Самі МЧ часто мають широкий розподіл по масах — від мезомолекул до астероїдів. У той же час, зважаючи на поширеній випадок переваги кулонівської взаємодії, велика кількість дослідницьких робіт була присвячена саме врахуванню впливу змінного заряду. Було знайдено, що загасання внаслідок змінного заряду переважає загасання Ландау для довгих хвиль (наприклад, пилових акустичних). Але нещодавно вийшла робота [8], де показано, що саме такі хвилі модифікуються впливом сил гравітації, які породжують їхні стабільні та нестабільні моди. Тому з огляду на потреби методу акустичної діагностики є необхідністю кінетичного розгляду впливу самогравітації з урахуванням розподілу по розмірах МЧ. Звичайно, додавання самогравітації ускладнює проміжні викладки, веде до появи ще одного доданка у виразі типу (10). Але загальний вигляд його відомий і в кінетичному [8], і в гідродинамічному підході. Наведемо лише основні формули, необхідні при застосуванні методу акустичної діагностики. Їх можна отримати, користуючись асимптотикою для інтегралу ймовірності для випадку пилових акустичних хвиль. Розглянемо тільки довгохвильове наближення, коли

$$k^2 U_d^2 \ll \Omega_j^2,$$

$$\Omega_j^2 = -1/(\mu-4)(a_0/a)^{\mu-1} \omega_p^2(a) \left|_{\frac{a_{\min}}{a_{\max}}}^{a_{\max}}\right.,$$

$$\Omega_p^2 = -1/(\mu-4)(a_0/a)^{\mu-1} \omega_p^2 \left|_{\frac{a_{\min}}{a_{\max}}}^{a_{\max}}\right.,$$

де $U_d(a) = \Omega_p/k_d$ — фазова швидкість DAW, ω_j — джинсівська частота, ω_p — ленгмюрівська частота. За таких умов вплив самогравітації є домінуючим; існують дві моди:

$$\omega_1^2 = -\Omega_j^2 + k^2 U_d^2(1-R), \quad (13)$$

$$\omega_2^2 = R k^2 U_d^2, \quad (14)$$

де $R = 4/(\mu-2)^2$. Слід тільки зауважити, що мода (13) відноситься до модифікованої джинсівської нестійкості, якщо права частина від'ємна. Коли права частина додатна, мода є стійкою, причому вона не існує у випадку монорозмірних МЧ. Обробка даних для акустичної діагностики — традиційна.

ВИСНОВКИ

1. Наведені вище фазові характеристики пилових акустичних хвиль можна використовувати при застосуванні методу акустичної діагностики у більшості варіантів запорошеної плазми.

2. Врахування дипольної складової призводить до появи нової пилової акустичної моди, але методика акустичної діагностики не вимагає модифікації.

3. Важливою властивістю запорошеної плазми з самогравітацією є сильна залежність її фазових характеристик для акустичного типу хвиль від показника в степеневому розподілі МЧ по розмірах.

Звичайно, відновлення функції розподілу мікрочастинок по розмірах в реальних умовах експерименту потребує так званого адаптивного оцінювання такої функції.

Автори дякують УНТЦ за часткову підтримку цієї роботи грантом NN 37.

1. Мартиш Є. В. Особливості використання акустичних хвиль для діагностики гетерофазної запорошеної плазми // Вісник КНУ. Сер. фіз.-мат. наук. — 2002. — № 1. — С. 320—323.
2. Kononenko Yu. M., Martysh, E. V. Unstable low-frequency wave of finite amplitude in complex plasmas // 4th International Young Scientists' Conf. on Applied Physics. Proceed. — Kyiv: National Taras Shevchenko University, 2004. — P. 243—244.
3. Kortsragen U. Usage of acoustic waves in dusty plasma for contaminated particles diagnostics // Appl. Phys. Lett. — 1997. — 71, N 2. — P. 208—210.
4. Malnev V. M., Martysh E. V. Dielectric Permittivity of Dusty Plasma with Account of Dipole Moments of Granules // First Cairo Conf. on Plasma Physics and Applications; Cairo — Egypt, 11—15 October, 2003.
5. Siva Rama Prasad P. V. Acoustic waves in a dusty plasma // Phys. Lett. — 1998. — A239. — P. 378—384.
6. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction in dusty plasma physics. — Bristol, 2002.
7. Verheest F. Waves in dusty plasmas. — Dordrecht: Kluwer, 2000.
8. Yaroshenko V., Jacobs G., Verheest F. Dust acoustic modes in self-gravitating plasma // Phys. Rev. — 2001. — E 63. — P. 066406.

ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF HETEROPHASE PLASMA

*Ye. V. Martysh, O. M. Radchenko, V. S. Sidorenko,
V. A. Yatsenko*

Our analysis of experimental and theoretical works on the propagation of acoustic waves in heterophase gas shown that the application of acoustic diagnostics in dusty plasma was advisable. The peculiarities of such systems and their influence on the corresponding dispersion relations are investigated. The gain-phase characteristics of acoustic-type vibrations for acoustic diagnostics are estimated.

УДК 533.9

Ю. А. Клименко, И. А. Кременецкий, О. К. Черемных

Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

Тензор диэлектрической проницаемости ионосферной пылевой плазмы

Надійшла до редакції 10.12.04

Одержано вираз для тензора діелектричної проникності іоносферної плазми з урахуванням впливу порошин, що обертаються та мають власний дипольний момент. Показано, що на частоті обертання порошин з'являються додаткові резонанси та може відбуватися розгойдування хвиль. Приведено вирази для інкрементів розгойдування та їхніх чисельних значень у денний та нічний іоносферний плазмі.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в ионосфере Земли на высотах 90—100 км из продуктов сгорания метеоров образуются пылевые слои [2]. Пыль в ионосферу может вноситься также за счет извержений вулканов, лесных пожаров, остатков ракетного топлива, наземных взрывов и ряда других антропогенных факторов. Гранулы пыли достаточно быстро накапливают большой отрицательный заряд, что существенным образом изменяет свойства ионосферной плазмы. За последнее десятилетие накоплен определенный опыт в изучении волновых свойств пылевой плазмы [3], однако в подавляющем большинстве случаев пылинки рассматриваются либо как точечные, либо как сферические объекты, не имеющие ни собственного дипольного момента, ни собственной частоты вращения. Однако экспериментальные наблюдения и теоретические оценки показывают, что гранулы пыли, помещенные в плазму, приобретают вращательный момент за счет столкновений с ее частицами. Для низкотемпературной плазмы, какой является ионосферная плазма, угловая частота вращения гранул пыли может достигать величин порядка 10^4 Гц, а механические моменты пылинок в первом приближении достаточно упорядочены и направлены вдоль геомагнитного поля. Поэтому ионосферная плазма, включающая в себя врачающиеся пылевые частицы, имеющие собственный дипольный момент, должна приобретать дополнительные волновые особенности, обусловленные вра-

щением пылинок. Исследованию этого вопроса и посвящена данная работа.

Для однородной ионосферной плазменной среды, которую мы будем рассматривать ниже, все волны можно считать плоскими, т. е. имеющими вид $\exp(-i\omega t + ik \cdot r)$. Тогда условие распространения волн

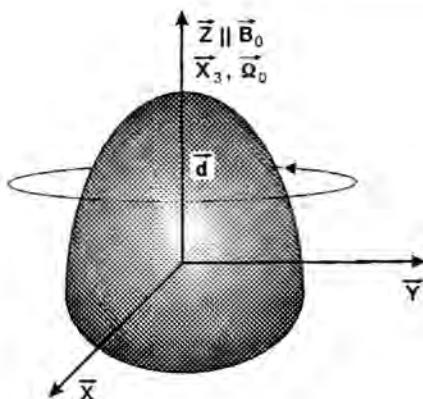
$$\det ||k^2 \delta_{\alpha\beta} - k_\alpha k_\beta - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\alpha\beta}|| = 0 \quad (1)$$

сводится к нахождению тензора $\epsilon_{\alpha\beta}$ диэлектрической проницаемости среды с вращающимися пылевыми гранулами, имеющими ненулевой дипольный момент.

ТЕНЗОР ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

С точки зрения электродинамики распространение волн в пылевой плазме можно рассматривать как процесс распространения электромагнитных полей в сплошной среде. Математически это соответствует следующему порядку упрощения уравнений: мы должны найти заряды и токи в плазме из уравнений движения частиц, а затем с помощью электродинамических уравнений изучить, как возбужденные ими поля могут распространяться в плазме [1]. Такой подход дает возможность найти тензор $\epsilon_{\alpha\beta}$ и описать все ветви линейных колебаний в пылевой плазме.

Для определения величины $\epsilon_{\alpha\beta}$ в (1) нам необхо-



Частица в лабораторной системе отсчета

димо решить уравнения движения частиц среды в возмущенных полях. Пренебрегая тепловым движением частиц, в лабораторной системе отсчета X , Y , Z , в которой вектор внешнего магнитного поля B_0 направлен вдоль оси Z (рисунок), уравнения движения для частиц имеют вид

$$m_{e,i} \frac{dV_{e,i}}{dt} = q_{e,i} \left(E + \frac{1}{c} V_{e,i} \times B_0 \right), \quad (2)$$

$$m_d \frac{dV_d}{dt} = q_d \left(E + \frac{1}{c} V_d \times B_0 \right) + \frac{1}{c} (\Omega \times d) \times B_0, \quad (3)$$

Здесь m_a , q_a — масса и заряд частиц, индексы $a = e, i$, d соответствуют электронам, ионам и пылинкам, Ω — угловая скорость вращения пылинок, d — их дипольный момент. Последнее слагаемое в (3) описывает взаимодействие дипольного момента вращающейся пылинки вытянутой формы с внешним магнитным полем. Уравнение движения пылевого компонента (3) необходимо дополнить уравнением сохранения момента импульса $M_a = I_{a\beta} \Omega_\beta$ пылинок:

$$\frac{dM}{dt} = d \times E. \quad (4)$$

Для упрощения предположим, что все частицы пыли абсолютно одинаковы и являются симметричными волчками. Связем с центром масс каждой из пылинок их собственные координатные оси x_1 , x_2 , x_3 . Тогда их дипольный момент d будет направлен вдоль оси x_3 , а два главных момента инерции равны между собой: $I_1 = I_2 \equiv I$, $I_3 \neq I$. Считаем, что самосогласованное электрическое поле E в плазменной среде «включается» в момент времени $t = t_0$, до которого пылинки вращались вокруг оси Z с угловой скоростью $\Omega_0 = M_0/I_3$, определяемой механическим моментом M_0 пылинки.

Для нахождения гидродинамической скорости пылинок V_d необходимо проинтегрировать уравнение (4) и подставить его в (3). После достаточно громоздкой, но очевидной процедуры интегрирования в собственных осях x_1 , x_2 , x_3 , перехода к лабораторной системе координат X , Y , Z и подстановки полученного результата в (3), получаем следующие уравнения движения пылинок

$$m_d \frac{dV^+}{dt} = qE^+ - i \frac{qB_0}{c} V^+ - \\ - i \frac{d^2 B_0}{cI} \exp(i\omega_r t) \int_{t_0}^t E^+(\tau) \exp(-i\omega_r \tau) d\tau, \quad (5)$$

$$m_d \frac{dV^-}{dt} = qE^- + i \frac{qB_0}{c} V^- + \\ + i \frac{d^2 B_0}{cI} \exp(-i\omega_r t) \int_{t_0}^t E^-(\tau) \exp(i\omega_r \tau) d\tau, \quad (6)$$

$$m_d \frac{dV_z}{dt} = qE_z, \quad (7)$$

где $V^\pm = V_x \pm iV_y$, $E^\pm = E_x \pm iE_y$, а частота $\omega_r = M_0/I$ определяет угловую скорость прецессии пылинки вокруг оси Z .

С помощью формул (5)–(7) после линеаризации уравнений (2)–(3) легко найти связь между скоростью частиц и возмущенным электрическим полем в плазме. Подставляя полученные выражения для скоростей в хорошо известную электродинамическую формулу

$$\epsilon E = E + i \frac{4\pi}{\omega} \sum_{e,i,d} q_a n_a V(E),$$

находим выражение для тензора диэлектрической проницаемости ϵ , которое можно представить в виде $\epsilon = \epsilon_{e,i} + \epsilon_d$, где $\epsilon_{e,i}$ — хорошо известный тензор диэлектрической проницаемости электрон-ионной плазмы [1], а тензор

$$\epsilon_d = \begin{pmatrix} \epsilon^d & ig^d & 0 \\ -ig^d & \epsilon^d & 0 \\ 0 & 0 & \eta^d \end{pmatrix} \quad (8)$$

определяет вклад пылинок. Компоненты тензора (8) имеют вид

$$\epsilon^d(\omega) = - \frac{\omega_{pd}^2}{\omega^2 - \omega_{pd}^2} - \\ - \frac{1}{2} \frac{\omega_{pd}}{\omega} \frac{\Omega_r^2}{\omega^2 - \omega_{pd}^2} \left(\frac{\omega + \omega_{pd}}{\omega + \omega_r} - \frac{\omega - \omega_{pd}}{\omega - \omega_r} \right), \quad (9)$$

$$g^d(\omega) = -\frac{\omega_{Bd}\omega_{pd}^2}{\omega(\omega^2 - \omega_{Bd}^2)} + \\ + \frac{1}{2} \frac{\omega_{Bd}}{\omega} \frac{\Omega_r^2}{\omega^2 - \omega_{Bd}^2} \left(\frac{\omega + \omega_{Bd}}{\omega + \omega_r} + \frac{\omega - \omega_{Bd}}{\omega - \omega_r} \right), \quad (10)$$

$$\eta^d(\omega) = -\frac{\omega_{pd}^2}{\omega^2}, \quad (11)$$

где

$$\omega_{pd}^2 = \frac{4\pi q_d^2 n_d}{m_d}, \quad \omega_{Bd} = \frac{q_d B_0}{m_d c}, \quad \Omega_r^2 = \frac{4\pi n_d d^2}{I}. \quad (12)$$

Из выражений (9)–(11) видно, что в случае $d = 0$ тензор диэлектрической проницаемости пылевого компонента плазмы совпадает с тензором, ранее полученным в приближении точечных зарядов пыли [3]. Интересной особенностью тензора (8) является его полная независимость от главного момента инерции I_3 , т. е. от частоты вращения пылинки вокруг собственной оси x_3 . Укажем также на следующее свойство найденного тензора: $\epsilon_d(-\omega_{Bd}, -\omega_r) = \epsilon_d(\omega_{Bd}, \omega_r)$, т. е. одновременное обращение направлений магнитного поля и собственного вращения пылинок полностью изменяет направление их вращения на противоположное. Это означает, что тензор диэлектрической проницаемости зависит от знака внешнего магнитного поля B_0 , и плазма с пылевыми частицами является магнитоактивной. Из выражений (9)–(11) также следует возможность появления дополнительных резонансов на частотах прецессии пылинок ω_r .

ВЛИЯНИЕ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЫЛИНОК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН

Для исследования условий распространения волн перепишем дисперсионное уравнение (1) в виде

$$k_\perp^2(\epsilon k_\perp^2 + \eta k_\parallel^2) - k_0^2[(\epsilon^2 - g^2 - \epsilon\eta)k_\perp^2 + 2k_\perp^2\epsilon\eta] + \\ + k_\parallel^4\eta(\epsilon^2 - g^2) = 0, \quad (13)$$

где $k_0^2 \equiv \frac{\omega^2}{c^2}$ — волновое число в вакууме, $k_\perp = ks\sin\theta$, $k_\parallel = k\cos\theta$, а θ — угол между векторами B_0 и k . В случае косого распространения волн по отношению к магнитному полю выражение (13) не допускает простых аналитических решений, поэтому ниже мы рассмотрим случаи продольного и поперечного распространения.

Продольное распространение ($\theta = 0$) собственных волн пылевой плазмы описывается уравнениями

$k^2 c^2 = (\epsilon \pm g)\omega^2$ и $\eta = 0$, а поперечно ($\theta = \pi/2$) — уравнениями $\epsilon k^2 c^2 = (\epsilon^2 - g^2)\omega^2$ и $k^2 c^2 = \omega^2\eta$. Из выражения (11) вытекает, что вклада дипольного момента пылинок в распространение продольных волн ($E \parallel B$) нет. В дисперсию поперечных ($E \perp B$) волн, распространяющихся продольно или перпендикулярно к магнитному полю, входят выражения вида

$$\epsilon \pm g = 1 - \frac{1}{\omega} \sum_{e,i,d} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega \pm \omega_{Bd}} \mp \\ \mp \frac{\omega_{Bd}}{\omega} \frac{\Omega_r^2}{(\omega + \omega_{Bd})} \frac{1}{\omega \pm \omega_r}, \quad (14)$$

Последнее слагаемое в правой части (14) учитывает вклад дипольного момента $|d|$ вращающихся пылинок. Поскольку в реальных условиях для величины дипольного момента заряженных гранул справедливо неравенство $|d| < |q_d|l$, где l — характерный размер пылинки, то частота Ω_r «дипольной осцилляции» заведомо ниже пылевой ленгмюровской частоты $\Omega_r \leq \omega_{pd}$. Из-за большой массы пылинок их ларморовская частота ω_{Bd} является самой малой из всех собственных частот пылевой плазмы. По этим причинам дипольный момент пылинок вносит существенный вклад в (14) только вблизи частоты вращения ω_r гранул. При резонансе между волной и вращениями пылинок колебания становятся неустойчивыми, и возможна их раскачка. Причем знак ω_r определяет резонанс с право- или левополяризованной волной.

Проанализируем раскачу продольно распространяющихся волн. Вследствие малости коэффициента при $(\omega \pm \omega_r)^{-1}$ резонанс на частоте $\omega_0 \approx \omega_r$ для собственных волн пылевой плазмы можно качественно рассматривать как токовую неустойчивость холодной плазмы. Следуя теории этой неустойчивости, введем малую поправку к частоте волны $\omega = \omega_r + \gamma_\omega$, $\gamma_\omega/\omega_r \ll 1$. Минимуму положительному значению γ_ω соответствует инкремент раскачки волн. Легко убедиться, что он находится из уравнения

$$\gamma_\omega \frac{\partial}{\partial \omega} \Lambda_\parallel(\omega, k) \Big|_{\omega=\omega_r} \pm 2 \frac{\omega_{Bd}}{\omega_r} \frac{\Omega_r^2}{(\omega_r \mp \omega_{Bd})\gamma_\omega} = 0, \quad (15)$$

где выражение

$$\Lambda_\parallel(\omega, k) = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} + \frac{1}{\omega} \sum_{e,i,d} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega \pm \omega_{Bd}}$$

определяет дисперсию волн. Частота ω_r в (15) является произвольной величиной, и в зависимости от параметров пылевой компоненты плазмы может изменяться в широком диапазоне частот. Нетрудно

Оценки инкрементов раскачки волн на вращающихся пылинках в ионосфере Земли

Диапазон	Дисперсия ω	Инкремент	Значение инкремента	
			День	Ночь
$\theta = 0$				
$\omega \ll \omega_{Bd}$	$k_z V_{Ad}$	$\gamma_{AD} = \frac{\omega_r}{kc} \Omega_r$	10^{-10}	10^{-9}
$\omega \sim \omega_{Bd}$	$\omega_{Bd} \left(1 - \frac{\omega_{pd}^2}{k^2 c^2} \right)$	$\gamma_{DIC} \approx \frac{\omega_{pd}}{k^2 c} \omega_{Bd} \Omega_r$	10^{-8} ($\omega_r \sim 10^{-6}$)	10^{-7} ($\omega_r \sim 10^{-5}$)
$\omega_{Bd} \ll \omega \ll \omega_{Bi}$	$\frac{k^2 c^2 \omega_{Bd}}{\omega_{pd}^2}$	$\gamma_{DW} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_r}{k^2 c^2} \right)^{1/2} \Omega_r$	10^{-5} ($\omega_r \sim 1$)	10^{-4} ($\omega_r \sim 1$)
$\omega = \omega_{Bi}$	$\omega_{ni} \left(1 - \frac{\omega_{pi}^2}{k^2 c^2} \right)$	$\gamma_{EIC} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_{Bi}}{k^2 c^2} \right)^{1/2} \Omega_r$	10^{-4} ($\omega_r \sim 100$)	10^{-3} ($\omega_r \sim 100$)
$\omega_{Bi} \ll \omega \ll \omega_{Be}$	$\frac{k^2 c^2 \omega_{Be}}{\omega_{pe}^2}$	$\gamma_{EW} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_r}{k^2 c^2} \right)^{1/2} \Omega_r$	10^{-3} ($\omega_r \sim 10^4$)	10^{-2} ($\omega_r \sim 10^4$)
$\theta = \pi/2$				
$\omega \ll \omega_{Bd}$	kV_{Ad}	$\gamma_{AD} \approx \left(\frac{\Omega_r^2}{k^2 c^2} \omega_r \right)^{1/3}$	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-8}$
$\omega_{Bd} \ll \omega \ll \omega_{Bi}$	kV_A	$\gamma_{AW} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_r^2 \Omega_r^2}{k^2 c^4 / V_A^2 + \omega_{pd}^4 / \omega_{Bd}^2} \right)^{1/3}$	10^{-6} ($\omega_r \sim 1$)	10^{-4} ($\omega_r \sim 1$)
$\omega_{Bi} \ll \omega \ll \omega_{pi}$	$\sqrt{k^2 c^2 + \omega_{pi}^2}$	$\gamma_{TW} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_r^2 \Omega_r^2}{k^2 c^2 + \omega_{pi}^2} \right)^{1/3}$	0.004 ($\omega_r \sim 1000$)	0.01 ($\omega_r \sim 1000$)
$\omega_{Bi} \ll \omega \ll \omega_{Be}$ $k \rightarrow \infty$	$\frac{\omega_{pd} \omega_{Be}}{\sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2}}$	$\gamma_{LHW} \approx \left(\frac{\omega_{Bd} \omega_{Be}^2 \Omega_r^2}{\omega_{Be}^2 + \omega_{pe}^2} \right)^{1/3}$	0.01	0.1

видеть, что в случае продольного распространения волн все известные ветви колебаний становятся неустойчивыми с инкрементами, пропорциональными частоте «дипольной осцилляции», т. е. $\gamma \propto \Omega_r$.

Для поперечно распространяющихся волн, слагаемым, пропорциональным ω_{Bd}^2 можно пренебречь, и уравнение для поправки γ_ω будет иметь вид

$$\gamma_\omega \frac{\partial}{\partial \omega} \Lambda_\perp(\omega, k) \Big|_{\omega=\omega_r} - \frac{\Omega_r^2}{\gamma_\omega^2} \frac{\omega_{Bd}}{(\omega_r + \omega_{Bd})} = 0,$$

где

$$\Lambda_\perp(\omega, k) = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} \left(1 - \sum_{e,i,d} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{Be}^2} \right) - (\varepsilon_\perp - g)(\varepsilon_\perp + g).$$

Следовательно, инкременты всех типов поперечно распространяющихся волн пропорциональны $\gamma \propto \Omega_r^{3/2}$.

В заключение приведем таблицу численных оценок для инкрементов раскачки волн на вращающихся пылинках в ионосфере Земли. Известно [2], что пыль в ионосфере имеет несколько фракций, различающихся размерами в интервале 10^{-8} – 10^{-6} м. Заряд пылинок зависит от их размеров и изменяется в интервале от 10 до -5 зарядов электрона ночью и днем соответственно, а концентрация основной фракции пыли в слоях D-области порядка 10 см^{-3} . Из таблицы видно, что инкремент раскачки поперечно распространяющихся волн несколько выше. Заметим также, что полученный нами ре-

зультат качественно совпадает с результатом работы [4], в котором похожие неустойчивости описаны в рамках другого подхода. Необходимо, однако, отметить, что в отличие от результатов работы [4] полученные нами численные оценки для инкрементов ионосферных волн существенно ниже, что позволяет надеяться на реализацию более «мягких» условий развития неустойчивостей. Расхождение в результатах связано с тем обстоятельством, что в работе [4] не было учтено последнее слагаемое в уравнении движения пылинок (3), связанное с взаимодействием вращающего дипольного момента с внешним магнитным полем.

Выводы

В приближении холодной замагниченной плазмы получено выражение для тензора диэлектрической проницаемости пылевой ионосферной плазмы с учетом дипольного момента вращающихся гранул пыли. Анализ полученного выражения свидетельствует о неустойчивости ионосферных волн на частотах вращения пылинок. Инкременты для продольного распространения волн пропорциональны частоте «дипольной осцилляции» $\gamma \propto \Omega_r$, а поперечно-го распространения — $\gamma \propto \Omega^{3/2}$. Таким образом, наличие дипольного момента у вращающихся пылинок обеспечивает резонансное раскачивание волн на частотах вращения пылинок в космической пылевой плазме. Отметим, что за рамками этой рабо-

ты остался вопрос о механизмах стабилизации обнаруженных нами неустойчивостей, который требует отдельного исследования.

Автори дякують УНТЦ за підтримку цієї роботи грантом NN 37.

1. Александров А. Ф., Богданович Л. С., Рухадзе А. А. Колебания и волны в плазменных средах. — М: Изд-во МГУ, 1990.—272 с.
2. Haynes O. Dusty plasmas in the ionosphere and its environment // Dusty plasma in the New Millennium: Third Intern. Conf. on the Phys. Dusty Plasmas.—2002.—CP649, AIP.—P. 13—21.
3. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction to dusty plasma physics. — London: IOP Publ. Ltd., 2002.—270 p.
4. Tskhakaya D. D., Shukla P. K., Tsintsadze N. L. Electromagnetic and dispersion properties of a magnetoplasma containing elongated and rotating dust grains // ЖЭТФ.—2001.—120, вып. 2(8).—С. 340—352.

THE DIELECTRIC PERMITTIVITY TENSOR OF IONOSPHERIC DUSTY PLASMA

Yu. O. Klymenko, I. A. Kremenetsky, O. K. Cheremnykh

The expression for dielectric permittivity tensor of ionospheric plasma is derived with taking into account a rotation of dust granules with nonzero dipole momentum. It is shown that extra resonance occurs at the frequency of the dust grains rotation which can lead to wave growth. The expressions for growth rates and their estimated values for day-time and night-time conditions of ionospheric plasma are presented.

УДК 523.98

А. Н. Кришталь, С. В. Герасименко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Неустойчивость высокочастотных ленгмюровских волн в предвспышечной плазме

Надійшла до редакції 18.10.04

На хромосферній ділянці струмового контура петлі в аркаді перед спалахом досліджено умови появи електронних плазмових хвиль внаслідок виникнення і розвитку відповідної високочастотної ленгмюровської нестійкості. Поява останньої зумовлена суккупною дією ефектів, пов'язаних з урахуванням парних кулонівських зіткнень у формі модельного інтеграла Батнагара — Гросса — Крука для повністю іонізованої плазми, а також наявності в струмовому контурі великомасштабного квазистатичного електричного поля, амплітуда якого адіабатично повільно збільшується з часом. Це збільшення є наслідком посилення взаємодії магнітних потоків в рамках механізму спалаху Хейвартса — Пріста — Раста. Показано, що ленгмюровська нестійкість може виникнути тільки на ранішньому етапі взаємодії потоків, коли у плазмі домінують електронно-іонні зіткнення. При умові виникнення на хромосферній ділянці контура аномального опору внаслідок появи насиченої іонно-звуковою турбулентності розвиток нестійкості ленгмюровських хвиль стає неможливим в рамках стаціонарного сценарію.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние крупномасштабного электрического поля и парных кулоновских столкновений в плазме петельных структур в активной области на условия возникновения и развития ленгмюровской неустойчивости было впервые исследовано одним из авторов в работе [23]. Было показано, что в рамках стационарного сценария развития неустойчивости [23, 24], при отсутствии в плазме пространственно локализованных пучков энергичных частиц [1, 5], неустойчивость ленгмюровских волн не возникает в фотосферных слоях токового контура петли [23]. Исследование именно фотосферных слоев было продиктовано большим количеством накопившихся к тому времени наблюдений квазипериодических волнообразных движений в фотосфере петель в течение всего времени вспышечного процесса [2]. Нынешний интерес к данной проблеме обусловлен несколькими причинами. Прежде всего, это огромное количество данных наблюдений, полученных в рамках международных исследовательских проектов Yohkoh, SOHO и TRACE [17]. Обработка полученных данных позволяет с определенностью говорить о решающей роли хромосферного участка

токового контура петли во всем ходе вспышечного процесса. Кроме того, в результате все того же резкого увеличения количества и качества данных наблюдений активных областей, в последние годы заметно выросло число теоретических исследований, посвященных использованию наблюдаемых в излучении вспышек квазипериодических процессов и пульсаций для диагностики вспышечной плазмы [6, 14, 17, 26, 27, 29, 30]. Причем значительная часть исследований посвящена именно условиям возникновения и распространения крупномасштабных колебаний петель [14, 27, 30], т. е. продольных (по отношению к магнитному полю петли B_0) плазменных волн. Если же иметь в виду конкретно высокочастотные электронные ленгмюровские волны, то исследование условий их генерации в предвспышечной и вспышечной плазме представляется чрезвычайно важным еще и с точки зрения известного механизма циклотронного мазерного излучения вспышек [26], а также большого количества трехволновых процессов слияния и распада плазменных волн [4, 32]. Здесь стоит отметить, что в упомянутой выше работе [23] было обнаружено, что с точки зрения возможного появления ленгмюровской неустойчивости плазма в верхних слоях

фотосфера петли находится в подкритическом состоянии, т. е. в коротковолновой области, где длина волны возмущений становится сравнимой по порядку величины с дебаевским радиусом, декремент затухания имеет резкий максимум, и ему совсем немного не хватает до того, чтобы перейти в верхнюю полуплоскость и из декремента превратиться в инкремент неустойчивости. Представляется вполне возможным, что именно это «немного» может быть обеспечено изменением эффективной частоты столкновений электронов и ионов [1] при переходе от недостаточно ионизованной плазмы верхних слоев фотосферы к почти полностью ионизованной плазме хромосферных слоев [25, 31].

С нашей точки зрения также представляет интерес исследование устойчивости ленгмюровских волн в рамках известного механизма вспышки Хейвартса — Присты — Раста [19], когда развитие вспышечного процесса в хромосферной части петли можно условно разделить на два этапа [8]. На первом, раннем, этапе амплитуда квазистатического субдрайсеровского [26] электрического поля мало отличается от своего равновесного значения [7], а эффективная частота столкновений в модельном интеграле столкновений БГК [1] определяется известным выражением для высокочастотных возмущений в полностью ионизованной плазме [1]. На втором, более позднем, этапе амплитуда поля увеличивается до предельно возможных в рамках стационарного сценария значений, а эффективная частота столкновений электронов с ионами должна быть заменена эффективной частотой столкновений электронов с пульсациями какого-либо типа насыщенной турбулентности [3, 9, 13]. Учитывая опыт предыдущих исследований [8, 10, 11] и уже известные пороги развития различных типов неустойчивостей [10, 22], в качестве эффективной частоты столкновений на этом этапе представляется правомерным использовать эффективную частоту столкновений электронов с пульсациями насыщенной ионно-звуковой турбулентности [3].

ОСНОВНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ И ИНКРЕМЕНТ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Дисперсионное уравнение для высокочастотных электронных ленгмюровских волн, фазовая скорость которых изменяется в диапазоне

$$\left| \frac{\omega}{k_z} - u_e \right| \gg v_{Te}, \quad (1)$$

при наличии в плазме слабого однородного электрического поля и учете парных кулоновских столк-

новений может быть получено стандартным способом из «продольной» части скалярной дисперсионной проницаемости горячей магнитоактивной плазмы со столкновениями [1, 23]. В соотношении (1) ω/k_z — фазовая скорость возмущения, v_{Te} — тепловая скорость электронов, u_e — скорость движения электронов относительно ионов, причем

$$u_e = \frac{eE_0}{m_e v_{ei}}, \quad (2)$$

где E_0 — амплитуда квазистатического электрического поля, параллельного магнитному полю петли B_0 , e и m_e — заряд и масса электрона, v_{ei} — частота парных столкновений электронов с ионами [1, 16]. Метод Пайнса — Шриффера учета влияния внешнего электрического поля на вид дисперсионного уравнения [28] пригоден только для низкочастотных возмущений — ионно-звуковых волн или магнитоакустических, причем для последних — только в том случае, когда выполняется условие [10, 22]

$$v_s^2/v_A^2 \ll 1, \quad (3)$$

где v_s — скорость ионного звука в плазме, а v_A — альвеновская скорость. Поэтому традиционный для наших исследований вопрос о сравнительном влиянии на вид дисперсионного уравнения (ДУ) членов «прямого влияния» [20, 21, 23, 24], которые появляются в ДУ только благодаря преобразованию Пайнса — Шриффера, и «потоковых» членов в данном случае лишен смысла. Поэтому здесь годится только специально разработанный для высокочастотных электронных волн метод Бринки — Дисте [18], и в ДУ будут только «потоковые» члены, которые представляют собой в конечном счете результат наличия сдвиговой скорости (2) в функции распределения электронов по скоростям [23]. Учитывая субдрайсеровский характер электрического поля [26], обычные для слабых полей соотношения [1, 28]

$$\frac{eE_0}{k_z k_B T_{ei}} \ll 1 \quad (4)$$

и

$$\epsilon_R \equiv \frac{u_e}{v_{Te}} = \frac{E_0}{E_D} \ll 1 \quad (5)$$

выполняются с большим запасом. Здесь k_B — константа Больцмана; T_{ei} — электронная (или ионная) температура, а $E_D = \frac{e}{m_e} v_{Te}^2$ — величина локального драйсеровского поля [1]. Поэтому, традиционно преисбрегая ионным вкладом в ДУ для электронных ленгмюровских волн, выражение для относительного инкремента, впервые полученное в работе [23], после несложных тождественных преобразо-

ваний можно записать в наиболее удобном виде:

$$\frac{\delta}{\omega_{pe}} = \frac{1 + k_L^2}{2(1 + 7k_L^2)} \left[\frac{\nu_{\text{зф}}}{\omega_{pe}} (3\varepsilon_R k_L \sqrt{1 + k_L^2} (1 + 11k_L^2) - 1) - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(1 + k_L^2)^{3/2}}{k_L^3} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(3 + \frac{1}{k_L^2}\right)\right) \right], \quad (6)$$

где ω_{pe} — ленгмюровская электронная частота, $d_e \equiv v_{Te}/\omega_{pe}$ — электронный дебаевский радиус, $k_L \equiv k_z d_e$, а k_z — продольная, направленная вдоль \mathbf{B}_0 составляющая волнового вектора возмущения. В пределах одного и того же «этажа» в теле петли, т. е. для одного и того же уравнения состояния предвспышечной плазмы, продольные градиенты плотности и температуры весьма незначительны [5, 27]. Кроме того, инкремент δ для ленгмюровских волн, как обычно, не зависит от отношения электронной и ионной температур [1]. Следовательно, в рамках механизма вспышки Хейвартса — Присте — Раста [19] выражение (6) для относительного инкремента на раннем и позднем этапах взаимодействия магнитных потоков будут отличаться только значениями ε_R и выражениями для $\nu_{\text{зф}}$. Принимая во внимание, что в данной работе мы исследовали хромосферные участки токового контура петли, в расчетах мы принимали, что на раннем этапе

$$\nu_{\text{зф}} = \sigma \nu^*, \quad (7)$$

где $\nu^* \equiv \sqrt{5/2} \nu_{ei}$ — эффективная частота столкновений полностью ионизованной плазмы [1], а σ — числовой множитель, введенный для феноменологического учета вклада взаимных столкновений всех заряженных частиц [23, 24]. На более позднем этапе вспышечного процесса, как уже было отмечено выше, мы полагали, что величина $\nu_{\text{зф}}$ в соотношении (7) определяется частотой столкновений электронов с пульсациями насыщенной ионно-звуковой турбулентности, т. е.

$$\nu_{\text{зф}} = \frac{1}{32\pi} \frac{u_e}{v_s} \omega_{pe} \approx \frac{\omega_{pe}}{100} \frac{u_e}{v_s}. \quad (8)$$

Эта турбулентность может быть результатом развития «чистой» ионно-звуковой неустойчивости, которая, как показали наши предыдущие исследования [11, 23, 24], имеет по величине ε_R порог возбуждения всегда заметно ниже, чем ленгмюровская. Кроме того, это выражение (8) можно рассматривать как приближенное для аналогичной частоты столкновений в том случае, когда турбулентность представляет собой конечный этап развития неустойчивости ПВ-волн, имеющих еще бо-

лее низкий порог возбуждения по величине ε_R . С нашей точки зрения, такая аппроксимация вполне допустима, поскольку ПВ-волны по своим основным характеристикам весьма близки к магнитоакустическим волнам, а те, в свою очередь, в нижней хромосфере практически неотличимы от ионного звука [7, 10, 22]. Напомним, что граничные значения для ионно-звуковой неустойчивости $(\varepsilon_R)_{\text{bound}} \approx 0.05$, т. е. эта неустойчивость появляется, согласно используемой терминологии, на более позднем этапе взаимодействия магнитных потоков и отсутствует на раннем. В то же время именно на раннем этапе появляется неустойчивость ПВ-волн, граничные значения для которой чрезвычайно низкие: $(\varepsilon_R)_{\text{bound}} = (4-6) \cdot 10^{-5}$. Считая, что в равновесном состоянии токового контура петли, когда ток в контуре есть, а взаимодействия магнитных потоков еще нет, значение $(\varepsilon_R)_{EQ} = 10^{-5}$ [8], и появление ленгмюровской неустойчивости представляется более вероятным на фоне ПВ-турбулентности, чем на фоне ионно-звуковой, поскольку для появления последней остается слишком мало времени. Действительно, ведь даже при $(\varepsilon_R)_{\text{bound}} \geq 0.20$ доля «убежавших» электронов становится недопустимо высокой [1], и стационарный сценарий развития неустойчивости не в состоянии реализоваться.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ, ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Относительный инкремент δ/ω_{pe} развития ленгмюровской неустойчивости был вычислен с помощью формулы (6) для раннего и позднего этапов развития вспышечного процесса в аркаде (петле), и семи уравнений состояния, т. е. семи пар значений электронной плотности n и температуры T (см. таблицу). При этом предполагалось, что величины ε_R и k_L изменяются в пределах

$$0.01 \leq \varepsilon_R \leq 0.8, \quad (9)$$

$$0.01 \leq k_L \leq 2\pi. \quad (10)$$

Нижние границы интервалов в (9) и (10) позволяет достаточно точно определить относительно простая структура выражения (6), поскольку при $k_L < 1$ экспоненциальный член в скобках становится исчезающе малым, а выражение во внутренних скобках при множителе $\nu_{\text{зф}}/\omega_{pe}$ с такими значениями k_L и при $\varepsilon_R < 0.05$ будет заведомо отрицательным. Верхняя граница $\varepsilon_R = 0.8$ в (9) взята с большим запасом, поскольку доля «убежавших» электронов становится недопустимо высокой еще при $\varepsilon_R \approx 0.2$.

Основные характеристики плазмы на различных участках токового контура петли

Вариант	$n, 10^{12} \text{ см}^{-3}$	$T, \text{ К}$	$h, \text{ км}$	$E_D, \text{ В/м}$	Примечание
1	2.4	4960	275	262	модель F2 из [25]
2	1.37	5290	375	140.4	модель F2 из [25]
3	0.385	5620	675	32.89	модель F1 из [25]
4	5.55	7910	975	380	модель F2 из [25]
5	29.0	9000	1100.25	307	модель F2 из [25]
6	11.6	29000	1102	38.10	модель F2 из [25]
7	0.105	6500	1380	14.61	модель E из [31]

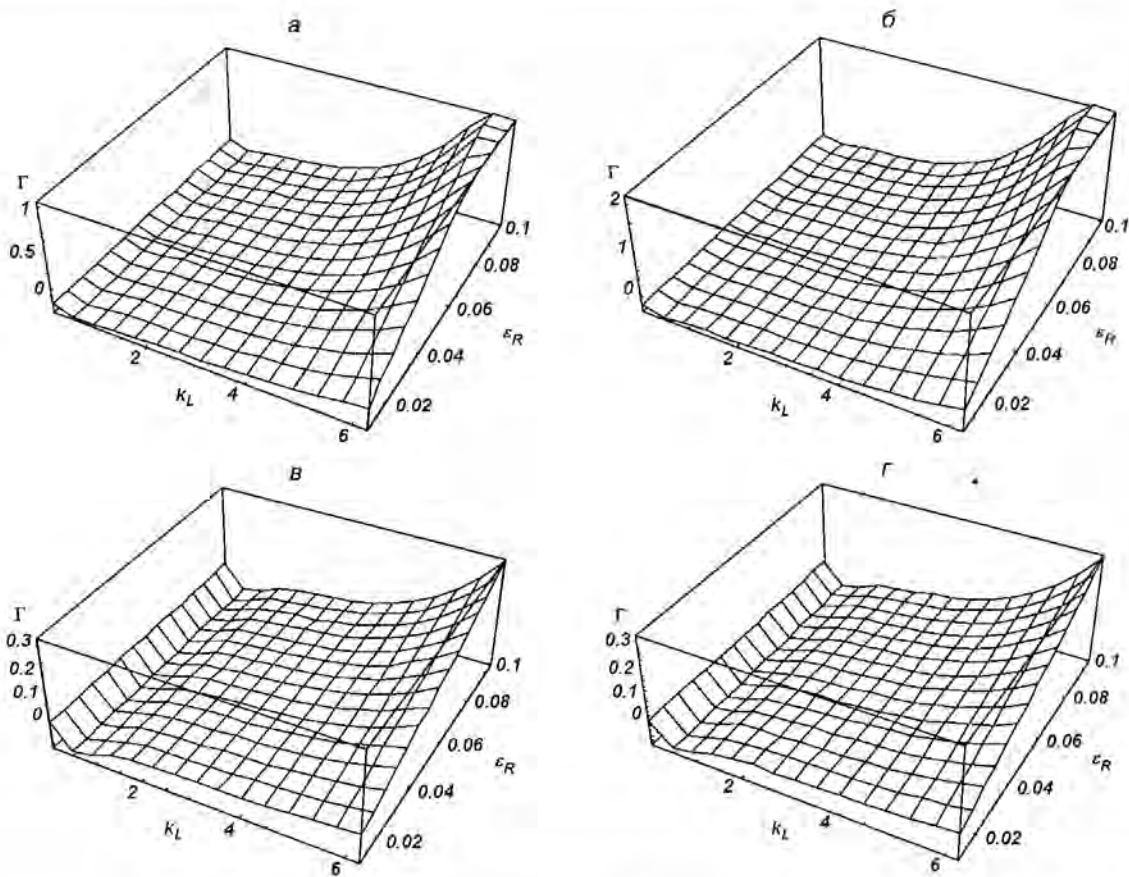


Рис. 1. Поведение относительного инкремента развития неустойчивости электронных ленгмюровских волн $\Gamma = \Gamma(\varepsilon_R, k_L)$ на ранней стадии взаимодействия магнитных потоков на различных высотах в хромосферном участке токового контура петли: а — вариант 4, б — вариант 5, в — вариант 6, г — вариант 7

Значение $k_L = 2\pi$ отражает тот факт, что при длине волны возмущения, меньшей дебаевского радиуса, строго говоря, нельзя пользоваться стандартным плазменным приближением [12], а следует использовать приближение независимых частиц [1].

Расчеты показали, что на раннем этапе взаимодействия магнитных потоков, — старого, проходящего через токовый контур петли в аркаде, и

нового, всплывающего из-под фотосфера, — неустойчивость ленгмюровских волн в плазме петли на высотах $h \leq 800$ км либо вообще отсутствует, либо всё-таки появляется, однако при таких значениях k_L и ε_R , которые отчетливо свидетельствуют о выходе за пределы используемых приближений. Это в целом подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в фотосферных и субфотосферных слоях

плазмы петель генерация высокочастотных ленгмюровских волн в рамках стационарного сценария развития неустойчивости невозможна. Зато она оказывается вполне возможной в субхромосферных и хромосферных слоях, причем для вариантов 4–7 в диапазоне высот 975–1380 км поведение относительного инкремента δ/ω_{pe} как функции аргументов k_L и ε_R имеет большое количество сходных черт. Как видно из рис. 1, ни одна из функций δ/ω_{pe} не описывает маргинальную неустойчивость [13, 23, 24], поскольку на всех четырех поверхностях в области $0.01 \leq k_L \leq 1.2$ для всех значений ε_R из (9) имеется более или менее отчетливо выраженный локальный минимум, т. е. переход через ноль из области $\delta < 0$ в область $\delta > 0$ имеется во всех четырех вариантах. Границные значения $(k_L)_{bound}$, при которых поверхность функции $\delta/\omega_{pe} = \delta/\omega_{pe}(k_L, \varepsilon_R)$ выходит в полупространство $\delta > 0$, изменяются в пределах $k_L \in [1.80; 3.35]$. Соответствующие величины $(\varepsilon_R)_{bound}$ изменяются в очень узком интервале значений от 0.089 (вариант 6) до 0.100 (вариант 7). При этом из-за различия в уравнениях состояния и, соответственно, значениях локальной амплитуды дрейсеровского поля [1], абсолютные граничные значения амплитуды квазистатического поля $E_0(t)$ для перечисленных четырех вариантов отличаются весьма сильно, изменяясь от $(E_0)_{bound} = 34.58$ В/м на высоте $h = 975$ км (вариант 4) до 1.45 В/м на высоте $h = 1380$ км (вариант 7). Как видно из рис. 1, в, г, на хромосферных высотах относительный инкремент с увеличением k_L увеличивается медленно, что свидетельствует о достаточно высокой добротности колебаний волн [5].

На позднем этапе взаимодействия потоков, когда эффективная частота столкновений определяется выражением (8), величина ν_{ϕ}/ω_{pe} зависит только от ε_R , и граничные значения амплитуды поля $(E_0)_{bound}$ в относительных единицах будут для всех семи случаев одинаковы (в абсолютных единицах они будут, разумеется, разными). Это позволяет анализировать поведение относительного инкремента как функции параметров k_L и ε_R на одном единственном графике. Этот график приведен на рис. 2. Граничные значения $(k_L)_{bound} = 1.19$ и $(\varepsilon_R)_{bound} = 0.7$ совершенно определенно указывают на то, что хотя в данном случае возмущения являются самыми длинноволновыми из всех ранее рассмотренных, а относительный инкремент увеличивается достаточно медленно с увеличением k_L , однако при такой доле убежавших электронов уже фактически не работают ни механизм прямого включения неустойчивости [23], ни линейное при-

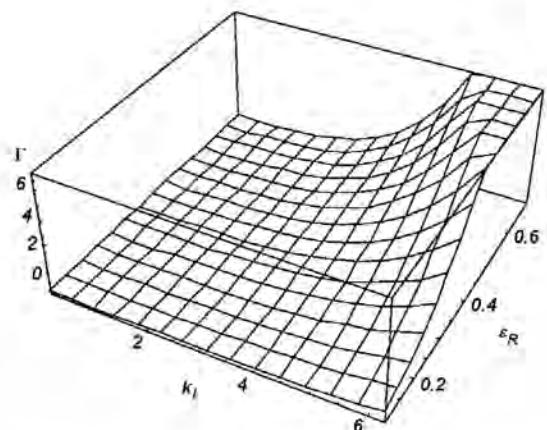


Рис. 2. Поведение относительного инкремента развития неустойчивости электронных ленгмюровских волн на более поздней стадии взаимодействия магнитных потоков на фоне насыщенной ионно-звуковой турбулентности в нижней хромосфере токового контура петли

ближение теории возмущений. В данном случае мы, очевидно, выходим за пределы используемых приближений и можем констатировать, что на более позднем этапе генерация высокочастотных ленгмюровских волн в петле невозможна в рамках стационарного сценария развития неустойчивости.

Таким образом, основные результаты проведенных исследований можно сформулировать следующим образом:

1. Неустойчивость высокочастотных электронных ленгмюровских волн может возникнуть и развиваться в рамках стационарного сценария в предвспышечной плазме хромосферного участка токового контура петли в аркаде. При этом предполагается, что общий ход развития вспышечного процесса определяется взаимодействием магнитных потоков согласно механизму вспышки Хейвартса — Приста — Раста [19].

2. Неустойчивость возникает на раннем этапе взаимодействия потоков, когда благодаря наличию достаточно сильного магнитного и слабого электрического полей в плазме доминируют электронно-ионные столкновения [23, 24]. При этом принципиально важным моментом для обнаружения ленгмюровской неустойчивости оказалось использование в расчетах эффективной частоты электронно-ионных столкновений в модельном интеграле БГК для полностью ионизованной плазмы [1]. Все расчеты были проведены для случая $\sigma = 1$, поскольку из выражения для относительного инкремента видно, что на линейной стадии развития неустойчиво-

сти увеличение σ приводит лишь к возрастанию инкремента по абсолютной величине.

3. На более позднем этапе взаимодействия потоков развитие ленгмюровской неустойчивости на фоне насыщенной ионно-звуковой турбулентности становится невозможным в рамках стационарного сценария и используемых приближений. Здесь наблюдается принципиальное отличие от случая ионно-звуковой неустойчивости, развивающейся на фоне «недонасыщенной» турбулентности, зарождающейся из генерации низкочастотных ПВ-волн [7]. Там ситуация прямо противоположная.

4. Проведенные расчеты показали, что для ленгмюровской неустойчивости выделение в развитии вспышечного процесса двух стадий, ранней и более поздней, по большому счету лишено смысла, поскольку граничное значение $(\varepsilon_R)_{bound} \approx 0.1$ на ранней стадии и так чрезвычайно близко к предельно допустимому. Совершенно очевидно только то, что возникновение ионно-звуковой турбулентности при дальнейшем росте амплитуды субдрайсеровского поля «гасит» неустойчивость. Вместе с тем близость граничных значений величины ε_R для целого ряда сильно отличающихся друг от друга уравнений состояния в нижней хромосфере указывает на то, что на раннем этапе ленгмюровская неустойчивость определенно есть и занимает вполне определенное место в иерархии других неустойчивостей в предвспышечной плазме. Судя по всему, она возникает последней в ходе развития вспышечного процесса, т. е. уже после появления ПВ-волн [7, 8, 22], КАВ, ИЗ и бернштейновских мод [20]. На первый взгляд, для краткосрочного прогноза вспышки в аркаде появление ленгмюровской неустойчивости является не самым важным событием. Ведь несмотря на действительно весьма эффективную высокочастотную модуляцию восходящего потока убежавших электронов, пока еще не совсем понятно, как именно эта информация может быть доставлена удаленному (наземному или космическому) наблюдателю [5]. Да и времени на прогноз, даже учитывая его краткосрочность, остается слишком мало, принимая во внимание почти предельные значения величины ε_R . Однако, с нашей точки зрения, гораздо важнее то, что вспышке в аркаде предшествует ряд определенных событий (т. е. появление разных типов плазменных неустойчивостей), происходящих в жестко заданной последовательности. Очевидно, что появление в этом ряду еще одного (дополнительного) члена увеличивает точность прогноза.

Авторы благодарят К. В. Аликаеву за участие в обсуждении и ценные замечания.

1. Александров А. Ф., Богданович Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. — М.: Высш. шк., 1989.—424 с.
2. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. и др. Полуземпирические модели фотосферы солнечного комплекса активности // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—11, № 2.—С. 11—24.
3. Галеев А. А., Сагдеев Р. З. Нелинейная теория плазмы // Вопросы теории плазмы. — М.: Госатомиздат, 1973.—Вып. 7.—С. 3—145.
4. Гуссенс М. Космическая магнитная гидродинамика / Под ред. Э. Прест. А. Худ. — М.: Мир, 1995.—484 с.
5. Зайцев В. Б., Степанов А. П., Цап Ю. Т. Некоторые проблемы физики солнечных и звездных вспышек // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 6.—С. 3—31.
6. Конышова Ю. Г., Степанов А. В., Цап Ю. Т. Радиальные колебания корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 11.—С. 870—879.
7. Кришталь А. Н. Неустойчивости низкочастотных волн в замагниченной столкновительной плазме с продольным электрическим полем и слабой неоднородностью плотности // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 5—20.
8. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Дисперсия волн в магнитоактивной плазме арочных структур с учетом субдрайсеровских полей и сильной неоднородности плотности // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 3.—С. 258—272.
9. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Генерация низкочастотных волн в плазме послевспышечных петель при наличии «сильной» неоднородности температуры // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2003.—99.—С. 119—131.
10. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Генерация магнитоакустических волн в передспалаховой плазме активных областей // Вісник КНУ. Сер. Астрономія.—2004.—Вип. 41—42.—С. 19—28.
11. Кришталь А. Н., Юхимук А. К. О влиянии продольных электрических полей на плазменные неустойчивости в солнечных магнитных ловушках // Кинематика и физика небес. тел.—1991.—7, № 2.—С. 23—32.
12. Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы. — М.: Мир, 1975.—526 с.
13. Сомов Б. В., Титов В. С., Вернштетт А. И. Магнитное пересоединение солнечных вспышек // Итоги науки и техники. Астрономия.—1987.—Вып. 34.—С. 136—237.
14. Терехов О. В., Шевченко А. В., Кузьмин А. Г. и др. Наблюдение квазипериодических пульсаций в солнечной вспышке SF 900610 // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 6.—С. 452—456.
15. Флейшман Г. Д. Чариков Ю. Е. Нелинейное насыщение циклотронного мазерного излучения // Астрон. журн.—1991.—68, вып. 4.—С. 719—731.
16. Чен Ф. Введение в физику плазмы. — М.: Мир, 1987.—398 с.
17. Aschwanden M. I. An evaluation of coronal heating models for active regions based on Yohkoh, SOHO and TRACE observations // Astrophys. J.—2001.—560, N 2.—P. 1035—1043.
18. Brinca A. L., Dysthe K. B. Effect of longitudinal electric fields on electrostatic electron cyclotron waves // J. Plasma Phys.—1983.—29, part 1.—P. 35—40.
19. Heyvaerts J., Priest E., Rust D. An emerging flux model for the solar flare phenomenon // Astrophys. J.—1977.—216, N 1.—P. 213—221.
20. Krashnal A. N. Bernstein wave instability in a collisional plasma with a quasistatic electric field // J. Plasma Phys.—1998.—60, part 3.—P. 469—484.

21. Kryshnal A. N. Low-frequency wave instabilities in a plasma with a quasi-static electric field and weak spatial inhomogeneity // *J. Plasma Phys.* — 2002. — 68, part 2. — P. 137—148.
22. Kryshnal A. N., Gerasimenko S. V. Slow magnetoacoustic-like waves in post-flare loops // *Astron. and Astrophys.* — 2004. — 420. — P. 1107—1115.
23. Kryshnal A. N., Kucherenko V. P. A possible excitation mechanism for a longitudinal wave instability in a plasma by a quasi-static electric field // *J. Plasma Phys.* — 1995. — 53, part 2. — P. 169—184.
24. Kryshnal A. N., Kucherenko V. P. Ion-acoustic instability caused by large-scale electric field in solar active regions // *Solar Phys.* — 1996. — 165, N 1. — P. 139—153.
25. Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.* — 1980. — 242, N 1. — P. 336—351.
26. Miller J. A., Cargill P. I., Emslie A. G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // *J. Geophys. Res.* — 1997. — 102, N A7. — P. 14631—14659.
27. Nakariakov V. M., Tsiklauri D. Wide-spectrum slow magnetoacoustic waves in coronal loops // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — 379. — P. 1106—1112.
28. Pines D., Schrieffer R. Collective behaviour in solid-state plasmas // *Phys. Rev.* — 1961. — 124, N 5. — P. 1387—1400.
29. Poletto G., Kopp R. A. Macroscopic electric fields during two-ribbon flares // *The lower atmosphere of solar flares* / Ed. by D. Niedeg. — Sacramento Peak, NM, 1986. — 50. — P. 453—465.
30. Somov B. V. *Fundamentals of Cosmic Electrodynamics*. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1994. — 364 p.
31. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III—Models of the EUV brightness components of the quiet-sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1981. — 45, N 1. — P. 635—725.
32. Yukhimuk A., Fedun V., Sirenko O., Voitenko Yu. Excitation of Fast and Slow Magnetosonic Waves by Kinetic Alfvén Waves // *AIP Conf. proc.* — 2000. — 537. — P. 311—317. — (Waves in Dusty, Solar and Space Plasmas: Proc. Conf.; Leuven, Belgium, 22—26 May, 2000).

HIGH-FREQUENCY LANGMUIR WAVE INSTABILITY IN PREFLARE PLASMA

A. N. Kryshnal, S. V. Gerasimenko

The conditions of rise of high-frequency electron plasma waves due to the appearance and development of the corresponding Langmuir instability were investigated at the chromospheric part of the loop current circuit in arcade before a flare. The rise of this instability is the result of the collective action of the effects connected with taking into account the pair Coulomb collisions in the form of the model integral of Bhatnagar — Gross — Crook for the fully ionized plasma, the presence of quasi-static large-scale electric field in the current circuit and adiabatically slow growth of the amplitude of this field in time. The growth is the result of the magnetic flux interaction in the framework of the Heyvaerts — Priest — Rust theory of a flare. It is shown that the Langmuir instability can rise only at the early stage of the flux interaction, when the electron-ion collisions dominate in plasma. When the anomalous resistance appears at the chromospheric part of current circuit due to the rise of the saturated ion-acoustic turbulence, the development of the Langmuir wave instability becomes impossible in the framework of stationary scenario.

УДК 57.045:613.693(4/9+477)

Є. Л. Кордюм

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України

Перспективи розвитку космічної біології та медицини у світі та в Україні

Надійшла до редакції 07.02.05

Висвітлюються перспективні напрями досліджень у світі з космічної біології та медицини сьогодення та майбутнього. Значна увага приділяється Програмі з космічної біології та медицини в Україні, яка розроблена в світлі визначеных світовою науковою пріоритетних напрямів у цій галузі і базується на одержаному в попередні роки фактичному матеріалі та висунутих українськими вченими орігінальних ідеях і гіпотезах, використанні нових методологічних підходів та моделей для наземних та космічних експериментів. Розглядаються основні напрями Програми, завдання та її науково-технічне забезпечення.

Міжнародна робоча група з космічної біології та медицини (International Space Life Sciences Working Group, далі — Група), членами якої є НАСА, Європейське космічне агентство, а також космічні агентства Канади, Німеччини, Франції, України та Японії (Україна стала її членом у 2000 р.) спрямовує сьогодні свою діяльність під девізом: 21 століття — ера спільних досліджень космосу зусиллями об'єднаної та динамічної міжнародної науково-дослідницької спільноти.

Визнані пріоритетні напрями цих досліджень згідно із II Стратегічним планом, визначенним на 27-му засіданні Групи у жовтні 2004 р. в Києві, охоплюють широке коло питань з космічної біології та медицини сьогодення і майбутнього (таблиця). У центрі уваги залишаються пізнання ролі гравітації у функціонуванні біосфери, а саме дослідження впливу мікрогравітації та інших факторів космічного польоту на клітинному і молекулярному рівнях організації живих систем, а також на генетичну стабільність, ріст, розвиток, репродукцію, тривалість життя та старіння, поведінку та орієнтацію рослинних та тваринних організмів у першому та наступних поколіннях. Значна увага приділяється дослідженням механізмів адаптації тварин до гострого або хронічного впливу факторів космічного польоту та їхньої реадаптації до земних умов шляхом досліджень циркадних ритмів, ендокринної, кровоносної та імунної систем, рідинної, електролітної та температурної регуляції, метаболізму і живлення тощо. Постійно наголошується акту-

альність фундаментальних досліджень впливу космічної радіації на живі істоти та виявлення критеріїв ризику для подальшої розробки засобів захисту людини у тривалих далеких космічних подорожах. Продовжуються дослідження кристалізації та

Пріоритетні напрями розвитку космічної біології та медицини у світі

- 1 Пізнання біологічної ролі гравітації у функціонуванні біосфери Землі. Біологічні ефекти мікрогравітації на клітинному і молекулярному рівнях
- 2 Біологія розвитку та репродуктивна біологія рослин і тварин. Адаптація до умов космічного польоту та реадаптація після повернення
- 3 Здоров'я та працевдатність людини у тривалих далеких космічних подорожах, психофізіологічна адаптація, визначення вимог та систем для аналізу роботи експедицій, опіники навантажень, розширення знань та можливостей комунікацій. Адаптація до умов космічного польоту та реадаптація після повернення
- 4 Встановлення діапазону ризику для здоров'я людини від впливу космічної радіації, включаючи можливість виникнення злокісних пухлин та мутацій
- 5 Біосферні дослідження: прогноз біологічних змін у регіональних та глобальному масштабах та оцінка наслідків цих змін. Екзобіологія
- 6 Моніторинг та оцінка токсичної та мікробної небезпеки всередині та зовні космічного корабля
- 7 Розробка засобів безпеки та працевдатності екіпажу під час подорожей та операцій за межами низької орбіти
- 8 Розвиток технологій та засобів утилізації відходів, біорегенерації для удосконалення замкнених систем життєзабезпечення та оптимуму відновлення ресурсів
- 9 Використання нових знань та технологій для прогресу людства

удосконалення методів сепарації матеріалів біологічного походження. Напрямок «Екзобіологія» включає дослідження процесів, пов'язаних з походженням, еволюцією та поширенням життя у Всесвіті. Пріоритетним напрямом є також пошук засобів визначення та прогнозу біологічних змін на Землі в регіональних та глобальному масштабах та оцінки наслідків цих змін для функціонування біосфери.

У зв'язку із значним прогресом досліджень Марса [5, 7], майбутніми польотами на Місяць і Марс з тривалим перебуванням людини за межами Землі в умовах різного гравітаційного навантаження плануються нові різновідні дослідження функціонування фізіологічних систем людини — серцево-судинної, м'язової, скелетної, нервої та ендокринної з метою пізнання механізмів, які лежать в основі гострої та довготривалої адаптації людини до умов мікро- та гіпер gravітації, виявлення діапазону ризику для життя та роботи в космосі та розробка засобів його зниження. Подальше удосконалення систем медичного обслуговування включає клінічні дослідження та спрямоване на створення засобів щодо запобігання, діагнозу та терапії можливих порушень здоров'я космонавтів. Стратегія розробки систем життезабезпечення базується на їхній самодостатності в космічному польоті та поверхні інших небесних тіл шляхом використання біологічних, фізичних та хімічних процесів для забезпечення регенерації повітря, постачання води, іжі та відновлення ресурсів.

Плані підготовки пілотованої експедиції на Марс загострили проблему забезпечення радіаційної безпеки космічних польотів, причому ця проблема марсіанської експедиції суттєво відрізняється від аналогічних проблем у земних умовах та при орбітальних польотах. Саме цим питанням і був присвячений колоквіум КОСПАР (Міжнародний комітет з космічних досліджень), який відбувся 28 вересня — 2 жовтня 2003 р. у м. Дубна за участю майже 150 спеціалістів з наукових та промислових організацій Росії, США, Японії, Німеччини, Канади, Болгарії, Австрії, та Італії під керівництвом президента колоквіуму академіка А. І. Григор'єва [3]. Сучасні дані розрахунків щодо радіаційного навантаження на екіпаж марсіанської експедиції та пов'язаного з нею радіаційного ризику показують, що при відсутності спеціальних захисних засобів рівні опромінення можуть досягати професійних дозових лімітів, встановлених для працівників атомної промисловості за час їхньої діяльності. Поряд з опроміненням високими дозами велику небезпеку становить хроніче опромінення в малих дозах. Тому для розробки засобів

радіаційної безпеки для членів майбутньої експедиції на Марс необхідне значне поглиблення знань про радіаційне ураження організму людини під дією опромінень, специфічних для міжпланетного простору, їхнього впливу на генетичні структури клітини, кровотворну та центральну нерову системи, зоровий аналізатор, мутагенну ефективність важких заряджених часток з високими значеннями лінійної передачі енергії. Для отримання таких знань важливе значення має проведення модельних експериментів з використанням численних біологічних об'єктів різного рівня організації та спеціальних джерел опромінення на основі можливостей сучасних прискорювачів.

Сьогодні Україна є одним із світових центрів комплексних досліджень в галузі космічної біології, які виконуються в науково-дослідних інститутах Національної академії наук України, Академії медичних наук України та вищих училищах закладах. Прийняття України у квітні 2000 р. до Міжнародної робочої групи з космічної біології і медицини є належною оцінкою її попереднього внеску у світову науку та визнанням її як гідного партнера у розвитку космічної біології та медицини у ХХІ столітті. У ході досліджень в рамках завершеної 2-ї та поточної 3-ї Національної космічної програми України одержано нові наукові знання про механізми біологічних ефектів мікрогравітації на популяційному, організмовому, клітинному та молекулярному рівнях та запропоновано оригінальні концепції гравічувливості клітини, росту, розвитку, репродукції та стійкості організмів в умовах мікрагравітації, що є основою для розробки космічних клітинних біотехнологій для потреб медицини, створення технологій контролюваних екологічних систем життезабезпечення космонавтів у тривалих космічних польотах та визначення тест-систем екологічного моніторингу біосфери (1, 2, 4, 6). Результати фундаментальних та прикладних досліджень за 28 проектами, які виконувалися за угодою між НКАУ та НАСА та фінансувалися через НТЦУ, жваво обговорювалися на двохденному науковому семінарі «Співробітництво НКАУ і НАСА у сфері космічних досліджень» 21—22 жовтня 2004 р. у Києві та отримали позитивну оцінку.

Програма з космічної біології та медицини в Україні на наступні роки розроблена у світлі визначених світовою науковою пріоритетними напрямами у цій галузі, базується на одержаному в попередні роки фактичному матеріалі, використанні нових методологічних підходів та моделей для підготовки та проведення наземних та космічних експериментів, виконання яких забезпечено наявним в Україні науково-технічним потенціалом. Програма



Основні напрями досліджень гравічутливості клітини

включає такі основні напрями: 1) біологія клітини в умовах зміненої гравітації; 2) біологія розвитку, тривалість життя та старіння в умовах зміненої гравітації; 3) взаємовідносини патогенних, симбіотичних та асоціативних мікроорганізмів та вірусів з рослинами, тваринами та людиною в умовах зміненої гравітації; 4) екзобіологія та пре-біотичний синтез; 5) використання магнітного поля для досліджень гравітропізму рослин; 6) біотехнологія, розробка методів космічного рослинництва, утилізації відходів в умовах мікログравітації, тест-систем моніторингу навколошнього середовища тощо; 7) космічна медицина. Головна увага приділятиметься експериментальній перевірці висунутих українськими вченими оригінальних концепцій та гіпотез у галузі космічної та гравітаційної біології з урахуванням тенденцій розвитку сучасної біології та медицини.

БІОЛОГІЯ КЛІТИНИ В УМОВАХ ЗМІНЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ

Клітинні та молекулярні механізми гравічутливості організмів (рисунок).

— Дослідження структури, фізико-хімічних та

функціональних властивостей біологічних мембрани з використанням модельних систем в умовах зміненої гравітації.

Дослідження плануються для експериментальної перевірки гіпотези гравітаційної декомпенсації, відповідно до якої первинним місцем дії мікログравітації є цитоплазматична мембра клітини, від стану якої значною мірою залежить нормальнє функціонування організму. Передбачено створення нових модельних систем з використанням як ліпосом, так і різних препаратів біологічних мембрани, зокрема препаратів цитоплазматичної мембрани, ендоплазматичного ретикулуму, пресинаптичних мембрани, синаптичних везикул тваринного походження, які необхідні для вивчення властивостей біологічних мембрани в умовах космічного польоту. Це внесе істотний вклад в розуміння механізмів адаптації організму в цілому до зміненої гравітації, з'ясування молекулярних механізмів розвитку патологічних змін та стане основою для розробки прийомів нормалізації функціонування клітин в умовах мікро- та гіперgravітації.

— Вивчення проліферативної активності клітин на клітинному та молекулярному рівнях та регуляції клітинного циклу в умовах зміненої

гравітації.

Ці процеси впливають на розвиток організмів, проте відомості про їхні зміни під впливом мікрагравітації дуже обмежені та суперечливі.

— З'ясування значення цитосклету — системи фібрілярних структур білкової природи — у гравічуватливості клітин.

Цитосклет виконує функції опорно-рухомого апарату клітини та визначає її механічні властивості. Особливо цікаве питання, через які метаболічні шляхи в клітині гравітація впливає на молекулярну організацію та динаміку перебудов актинових та тубулінових елементів цитосклету у процесах ділення, росту та диференціювання клітин різних типів.

— Вивчення функціонування сигнальних систем в клітинах в умовах мікрагравітації.

Плануються дослідження: 1) ендогенного рівня цАМФ у проростках вищих рослин, активності ферментів обміну цАМФ — фосфодиестерази та аденилцилази, взаємодії двох систем вторинних посередників — іонів кальцію та цАМФ, взаємодії між аденилатциклазою системою та фітогормонами в умовах зміненої сили тяжіння; 2) вмісту фосфатидилінозитол 4,5-біфосфату, фосфатидилінозитол 4-фосфату та фосфатидилінозитолу в клітинах рослин в умовах зміненої гравітації, ролі інозитол 1,4,5-трифосфату у процесах регуляції вмісту кальцію у зв'язку з регуляцією метаболізму клітин в цих умовах, активності протеїн кіназ, фосфатаз та фосфорилювання білку у процесах трансдукції сигналів; 3) метаболізму кальцію, 4) синтезу мітохондріальних та ядерних білків; 5) сигнальних каскадів лімфоцитів через поверхневі рецептори в умовах мікрагравітації.

Після завершення проекту «Геном людини» першорядним стало вивчення «функціонального геному», чи протеому, яке дозволяє з'ясувати зв'язок структуру генів з їхньою функцією, з'ясувати механізми регуляції диференціальної експресії білків та їхніх посттрансляційних модифікацій і дослідити взаємодію білків та їхніх окремих структурних та функціональних доменів. Вивчення в цьому напряму сигнальних каскадів лімфоцитів, зокрема регуляції запрограмованої смерті клітин, чи апоптозу, є новим підходом до виявлення гравічуватливих та гравізалежних процесів в клітині.

— Застосування культури лімфоцитів людини як адекватної клітинної моделі для вивчення впливу мікрагравітації і циклічного освітлення на деякі ритмологічні характеристики організму людини та для пошуку шляхів запобігання порушенню хронобіологічного стану космонавтів.

Припускається, що використання вперше розроб-

леної клітинної моделі периферійного фоточутливого циркадіанного (добового) годинника людини дасть можливість виявити досі невідомі особливості впливу мікрагравітації, та перемежованого освітлення на біоритмологічну структуру процесів життєдіяльності в організмі, що є однією з найважливіших медико-біологічних проблем, пов'язаних з порушенням нормальної часової структури перебігу фізіологічних функцій організму — десинхронозу в умовах космічного польоту.

— Вивчення функціонування клітинних органел (мітохондрій та ендоплазматичного ретикулуму) в умовах зміненої гравітації.

Дослідження спрямовані на визначення перебудов внутрішньоклітинного гомеостазу кальцію, оскільки регуляція цитоплазматичної концентрації іонів кальцію у нервових та ендокринних клітинах має істотне значення для функціонування нервової та ендокринної систем та її порушення призводить до патологічних змін функцій клітин та їхньої загибелі. Знання характеру морфологічних та функціональних змін нервової та ендокринної систем під впливом мікрагравітації на клітинному та молекулярному рівнях сприятиме розумінню небажаних змін стану здоров'я космонавтів у тривалих космічних польотах.

— Дослідження процесу передачі нервового сигналу — імпульсу, ключовим етапом якого є вивільнення специфічних нейромедіаторних речовин з нервових закінчень, тобто нейросекреції.

Одним із шляхів розуміння механізму виникнення морфологічних та функціональних змін у мозку в умовах космічного польоту є саме дослідження нейросекреції. На теперішній час питання про вплив гравітації на стан мембранистих структур, які регулюють кальцієву проникність пресинаптичної мембрани і, таким чином, впливають на процес нейросекреції, залишається цілком недослідженими, а більшість досліджень впливу мікро- та гіпергравітації на нервову систему стосуються головним чином морфології. На підставі попередньо отриманих експериментальних даних щодо різної чутливості етапів нейросекреторного процесу до зміненої гравітації та припущення, що різні ділянки головного мозку щурів (великі півкулі та мозочок) мають різну чутливість щодо впливу гіпергравітаційного стресу, плануються нейрохімічні дослідження процесу передачі нервового імпульсу в різних ділянках головного мозку при адаптації до умов зміненої гравітації. Основна увага буде приділена отриманню таких характеристик процесу нейросекреції: активного захвату різних нейромедіаторних амінокислот нервовими терміналами ділянок головного мозку щурів, кальцій-залежного

та кальцій-незалежного вивільнення нейромедіаторів з нервових закінчень при деполяризації пресинаптичної мембрани різними деполяризуючими факторами, кальцієвої проникності пресинаптичної мембрани синаптосом. Мікログравітація створює виняткові можливості для вивчення синаптичної та нейронної пластичності. Одержані результати внесуть істотний вклад в розуміння фундаментального механізму передачі нервового імпульсу та механізму адаптації нервової системи і організму в цілому до перевантажень, дозволяють з'ясувати молекулярні механізми розвитку патологічних змін та стануть основою для розробки методів нормалізації функціонування нервових клітин в умовах мікрогравітації.

— Вивчення впливу зміненої гравітації на гуморальну імунну відповідь, В-лімфоцити та антитіла, які вони продукують.

Ці дослідження плануються на підставі припущення, що різні етапи імунної відповіді можуть бути по-різному чутливі до дії мікログравітації, на відміну від більшості попередніх досліджень, які вивчали вплив космічного польоту на метаболізм Т-лімфоцитів. Підбирається найадекватніші методи дослідження імунної відповіді *in vitro* в умовах космічного польоту та проведення досліджень впливу зміненої гравітації на метаболізм гібридом — гібридів нормальних В-лімфоцитів і пухлинних клітин, а також розвиток первинної та вторинної гуморальної імунної відповіді в культурі лімфоцитів миши.

— З'ясування структурно-функціональної організації клітин різних типів в умовах зміненої гравітації.

Планується дослідити, яким чином зміни метаболізму в умовах мікログравітації інтегруються у фізіологічні та морфологічні реакції клітин різних типів, безпосередньо пов'язаних із здійсненням їхніх функцій. Передбачаються: а) вивчення морфології, ультраструктури клітин, ступеня поліморфізму зеленої водорості *Desmodesmus armatus*, її життєздатності та спорогенезу в умовах зміненої гравітації; б) порівняльні ультраструктурні дослідження аміlopластів запасаючої паренхими мінібульб та клітин мезофілу листків картоплі в умовах зміненої гравітації; в) активності ферментів УДФ-глюкозо-фосфорилази та крохмаль синтетази, вмісту специфічних білків, мРНК та стресових білків у клітинах паренхими мінібульб та листків для з'ясування молекулярних механізмів змін вуглеводного обміну в цих умовах та їхніх проявів на структурному рівні.

— Визначення механізмів функціонування гравірецепторного апарату рослин під впливом зміненої

гравітації та гравістимуляції.

Планується розробка експериментального тестування та удосконалення нової орігінальної моделі гравірецепції статоцитами кореневого чохлика.

— Дослідження фотосинтезу в умовах зміненої гравітації.

Досліди спрямовані на виявлення ділянок, які лімітують фотосинтез під впливом мікログравітації, на визначення квантового виходу фотосинтезу та накопичення відновника НАДФН, пігмент-білкового і поліпептидного складу тилакоїдних мембрани, розподілу електронів між циклічним та нециклічним каналами в електрон-транспортному ланцюзі, індукованих фосфорилюванням мембраних комплексів. Для перевірки гіпотези, що в умовах мікログравітації корекція гормонального складу при зміні умов освітлення сприятиме адаптації рослин до цих умов та підвищенню їхньої продуктивності, плануються дослідження впливу інтенсивності та спектрального складу світла на формування пігментної та мембральної систем фотосинтетичного апарату в умовах зміненої сили тяжіння. Визначатиметься також енергетичний потенціал рослин з метою встановлення зв'язку між інтенсивністю та спектральним складом світла та ефективністю фотосинтетичного перетворення енергії в умовах мікログравітації, що є одним з вихідних положень у створенні технології космічного рослинництва.

— Вивчення впливу зміненої гравітації на процес трансформації рослинної клітини під впливом *Agrobacterium tumefaciens*.

Використовуватиметься метод культури *in vitro* первинних експлантів запасаючих органів рослин для вивчення основних молекулярних процесів, необхідних для трансформації — активація РНК-полімераз I та II, активність кальцій-залежних ферментів, синтез білків у період найбільшої чутливості до трансформуючого агента з метою з'ясування ролі модифікації метаболізму кальцію та утворення PR-білків, зв'язаних з патогенезом, у процесі пухлиноутворення, а також дії на цей процес певних антипухлинних препаратів в умовах мікログравітації.

— Запровадження методів неперервного та неруйнівного моніторингу фізіологічного стану клітин мікроорганізмів в умовах мікログравітації шляхом вимірювання електричного опору та ємності суспензії клітин як функції частоти змінного електричного поля на підставі раніше одержаних даних, що величина електричного заряду зовнішньої поверхні клітин та відповідна її поверхнева електропровідність добре корелюють з віковими змінами клітин, активацією чи притніченням їхньої

функціональної активності (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена НАН України, Інститут молекулярної біології та генетики НАН України, Інститут фізіології рослин та генетики НАН України, Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Інститут біоімії ім. О. В. Палладіна НАН України).

БІОЛОГІЯ РОЗВИТКУ, ТРИВАЛЬСТЬ ЖИТТЯ ТА СТАРІННЯ В УМОВАХ ЗМІНЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ

— Дослідження детермінації процесів онтогенетичного розвитку рослин в умовах мікрогравітації.

Передбачається визначення векторності клітинних структур і кінетичних параметрів їхнього формування, циркадної ритміки клітинних і тканинних ефектів та сигналів, які контролюють проходження етапів онтогенезу та морфогенезу в умовах зміненої гравітації. Планується також розробка методів регуляції онтогенетичного розвитку, послабленого дією зміненої сили тяжіння.

— З'ясування впливу зміненої гравітації на ростові рухи та морфогенез мохів.

Проводитиметься аналіз позитивного гравітропізму протонеми різних видів мохів під дією синього світла, поляризаційної дії гравітації на проростання та морфогенез проростків спор гравічувливих та мало чутливих видів мохів, морфогенетичного впливу гравітації на процеси регенерації ізольованих органів гаметофіту та спорофіту для з'ясування природи взаємозв'язків фото— і гравітропізмів у ростових та формотворчих процесах мохів.

— Дослідження онтогенезу вищих рослин з метою з'ясування можливостей вегетативного та насінневого розмноження сільськогосподарських та дикорослих рослин в умовах зміненої гравітації та розробки рекомендацій для їхньої культивації в космічних оранжереях.

Планується вивчення структурних і фізіологобіохімічних особливостей формування насіння та плодів, а також органів вегетативного розмноження (цибулин, бульб та турionів) в умовах зміненої гравітації, визначення параметрів утворення етилену та його впливу на рослини в замкнутому гермоб'ємі.

— З'ясування впливу герметичності та зміненої гравітації на ріст і розвиток орхідних.

Пропонується аналіз функціональної ролі поверхневих біоелектричних потенціалів для оцінки фізіологічного стану рослин, отримання інформації

про інтенсивність обмінних процесів і аналіз вивчення впливу сполук кремнію на фізіологічно-біохімічні процеси, адаптаційну здатність орхідних до умов зміненої гравітації і порушення водозабезпечення.

— Дослідження структури органів та фізіологобіохімічних процесів у тварин в умовах гіпергравітації з метою з'ясування механізмів гіпергравітаційного стресу, можливого в космічних польотах.

Планується вивчення співвідношення інтенсивності газообміну, терморегуляції та активності ключових антиоксидантних ферментів, експресії стрес-білків та апоптозу у мишів і щурів різного віку під впливом хронічних сеансів гіпергравітації; пошук засобів усунення негативних наслідків гіпергравітаційних навантажень за допомогою інгібіторів апоптозу та індукторів шаперонів. Передбачається дослідити профілактичну та коригуючу дію біорегуляторів на структурно-функціональні зміни в життєво важливих органах (головний мозок, кишечник, печінка та селезінка) щурів, викликані гіпергравітацією, іонізуючою радіацією та комбінованою дією цих факторів з метою визначення найефективнішої коригуючої дії біорегуляторів і розробити методичні рекомендації щодо застосування комплексу антиоксидантів і біорегуляторів в умовах космічного польоту (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Інститут фізіології рослин та генетики НАН України, Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Інститут екології Карпат НАН України, Інститут фізики НАН України, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України та Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України, Інститут онкології АМН України та Інститут геронтології АМН України).

ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ПАТОГЕННИХ, СИМБІОТИЧНИХ І АСОЦІАТИВНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ ТА ВІРУСІВ З РОСЛИНАМИ, ТВАРИНАМИ І ЛЮДИНОЮ В УМОВАХ ЗМІНЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ

— Дослідження взаємовідношень рослини-хазяїна з патогенними бактеріями і вірусами в умовах зміненої гравітації.

Досліди базуються на концепції змін імунітету рослин і агресивності патогенних організмів в умовах мікрогравітації. Концепція тестиуватиметься шляхом досліджень в умовах зміненої гравітації: 1) агресивності популяцій бактерій, наявності літичних агентів (фаги, цини), ролі ліпополісахаридів в адсорбції фагів та цинів і полібіотрофії бактерій під

впливом зміненої гравітації в системі бактерія — рослина; 2) ультраструктурної організації клітин листків, стебел та коренів здорових та вірусінфікованих рослин пшениці, репродукцію вірусу та його транспорту по рослині; фізіологічного стану здорових і вірусінфікованих рослин; 3) вмісту мембраноз'язаних і цитоплазматичних полісом в рослинах, інфікованих вірусом кучерявої карликості картоплі; ліпідів і вуглеводів у складі вірусів, ізольованих з інфікованих рослин, вірусних включень у клітинах інфікованих рослин в умовах зміненої гравітації.

— Вивчення впливу зміненої гравітації на ростові, морфологічні та спектральні характеристики лізогенної культури ціанобактерій.

Аналізуватимуться рівень індукції помірного віrusу цієї культури, фізіологічні та молекулярно-біологічні властивості вірусів, індукованих в умовах зміненої гравітації як основи для рекомендації цієї уніфікованої модельної системи для вивчення впливу мікрогравітації на індукцію ДНК-геномних вірусів.

— Дослідження трьох типів молекулярно-генетичних процесів (утворення транспозонних мутантів, перебудови ДНК, експресія гена, що «мовчить»), які відбуваються у модельних бактерій в умовах мікрогравітації, з метою розробки моделі, за допомогою якої можна прогнозувати утворення та поширення модифікованих бактерій у цій системі.

Важливим є з'ясування особливостей впливу корисних для рослин ендофітних бактерій, у тому числі генетично модифікованих, на розвиток рослин в умовах космічного польоту у порівнянні з наземним контролем, що матиме істотне значення для розробки технологій космічного рослинництва.

— Вивчення особливостей репродукції адено-вірусів в епітеліальних та лімфобластоїдних клітинах різної чутливості в умовах зміненої гравітації. Досліджуватиметься також комбінована дія цього фактора, інгібіторів іонів кальцію, блокаторів кальцієвих каналів та екзогенного цАМР, а також вплив зміненої гравітації на спроможність лімфобластоїдних клітин продукувати інтерферон та деякі інші лімфокіни.

— Розробка оригінального комплексного засобу зниження негативного впливу космічного польоту та інших екстремальних факторів зовнішнього середовища, у першу чергу радіації, на здоров'я людини та спосіб боротьби з РНК-та ДНК-вірусними хворобами (спалахи грипу, вірусгерпесні інфекції та ін.).

Розробка базується на вивчені впливу факторів космічного польоту в комбінації з синтезованим

препаратором із ряду ізатінів та α -інтерферону на моделях рослинних і тваринних клітин, уражених та не уражених вірусами, та на моделі вірусної інфекції.

— Дослідження впливу факторів космічного польоту на біологічні властивості резидентної мікрофлори людини *in vitro* та *in vivo* та оцінка здатності мікроорганізмів до реалізації потенційних патогенних властивостей в екстремальних умовах.

Передбачаються розробка та впровадження методу інтегральної оцінки життєздатності та функціонального стану мікроорганізмів в умовах орбітального польоту. Ці фізіологічні показники пов'язані з рухливістю клітин у штучних модулях, що відтворюють середовище існування мікрофлори. При виконанні досліджень будуть використані найновіші методи спостережень за динамікою мікробних популяцій. Планується створення малогабаритної портативної апаратури для інтегральної оцінки функціонального стану представників резидентної мікрофлори людини і одержання об'єктивної інформації щодо стабільноті біологічних властивостей мікробних тест-об'єктів, особливо їхньої вірулентності. Дослідження на лабораторних тваринах після довготривалої дії гіподинамії, або електромагнітних хвиль мідіапазону, або комбінованої дії цих факторів дадуть можливість виявити основні ланки порушень гомеостазу тварин, у тому числі імунного гомеостазу, та оцінити особливості розвитку інфекційно-запального процесу в заданих умовах наземного експерименту. Вивчення особливостей реалізації потенційних патогенних властивостей умовно-патогенних бактерій у макроорганізмі на тлі біологічного стресу (гіподинамії) і впливу інших факторів космічного польоту дозволить науково обґрунтувати біологічний захист космонавтів від можливого агресивного впливу резидентної мікрофлори (Інститут мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України, Інститут молекулярної біології та генетики НАН України, Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України, Інститут урології та нефрології АМН України, Національний київський університет ім. Тараса Шевченка).

ЕКЗОБІОЛОГІЯ ТА ПРЕ-БІОТИЧНИЙ СИНТЕЗ

— Дослідження взаємодії протеїногенних амінокислот з поверхнею неорганічних високодисперсних часток.

Вивчення впливу факторів відкритого космосу на живі істоти з низьким обігом речовин — лишайники (ліхенофільні гриби) (Інститут хімії поверхні та

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України).

ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ГРАВІТРОПІЗМУ РОСЛИН

— Проведення пошукових експериментів щодо впливу комбінованого магнітного поля (постійного та змінного магнітного поля заданих частот) на гравітропічну реакцію рослин та магнітні шуми, які генерують рослини.

Метою експериментів є розробка та використання нової методології з'ясування механізмів гравітропізму рослин.

— Дослідження за допомогою високоградієнтних магнітних полей механізму гравірецепції у рослин.

Планується вивчення ультраструктури гравірецепторних клітин, метаболізму кальцію, кінетики вигину кореня, взаємодії цитоскелету з клітинними компонентами з наступним математичним аналізом отриманих результатів та моделюванням механізмів гравічутливості кореня (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Інститут фізики НАН України, Фізико-технічний інститут ім. Б. Є. Вєркіна НАН України).

БІОТЕХНОЛОГІЯ

— Отримання довершених мікро- та нанокристалів золота і платини з водних розчинів при нормальніх умовах і з використанням як відновлювачів біополімерів — екзополісахаридів мікрородоростей в умовах мікログравітації.

В основу розробки покладено гіпотезу щодо змін дифузійного шару позаклітинних метаболітів у цих умовах, внаслідок чого екзометаболіти, екскретовані клітиною, не розповсюджуються у навколоїнші культуральне середовище, а накопичуються у межах дифузійного шару біля клітинної поверхні.

— Розробка конструкцій установки сенсорів у камери для скобіосистем, виготовлення тонкоплівкового мультисенсора для камер, а також запобіжних заходів від деградації чутливого шару під впливом паразитної мікрофлори камер, електронної та програмної підтримки сенсорного комплексу.

— Удосконалення сорбційних методів детоксикації та корекції гомеостазу організму космонавтів під час польоту (профілактика, лікування) і після повернення на Землю (лікування, реабілітація).

Передбачається використання принципово нових некапсульованих вуглецевих гемосорбентів (для

очищення крові) та ентеросорбентів (для внутрішнього прийому) з радіопротекторною, поглинаючою та ензимоподібною функціями, при застосуванні яких відбувається очищення і стабілізація клітинних мембран, істотне покращення мікроелементного та сольового обміну, показників імунитету, функцій печінки та нирок, підвищення добового діурезу.

— Дослідження впливу зміненої гравітації на спрямованість та інтенсивність перебігу метаболічних та енергетичних процесів, стан антиоксидантних систем в організмі олігохет (гіbrid червоного каліфорнійського черв'яка) в процесі утилізації ними біосубстрату з різним співвідношенням органічних та мінеральних компонентів.

Метою досліджень є вивчення віддалених наслідків впливу мікログравітації на життєдіяльність і відтворювальну здатність олігохет, що необхідно для розробки рекомендацій щодо їхнього використання в ланці утилізації відходів у контролюваних екологічних системах життезабезпечення космонавтів.

— Розробка конструктивних підходів до управління фізичними, хімічними та біологічними характеристиками замінників ґрунту для формування закритих біосистем. Вивчення чутливості та адаптаційної реакції ґрунтової екосистеми на зовнішні впливи з використанням штучних ґрунтів як фізичної моделі ґрунтового субстрату.

— Створення технологій «зеленого конвеєра» для пілотованих космічних апаратів, який має бути необхідною ланкою контролюваних екологічних систем життезабезпечення космонавтів.

Довгострокове перебування людини поза Землею у замкненому просторі з додатковим психологічним навантаженням, усунення якого потребує створення зеленого куточка із звичними рослинами, які до того ж можна використовувати в їжу як смакові та вітамінні додатки. Таким вимогам відповідає «зелений конвеєр» — безперервне вирощування харчових рослин, які швидко ростуть (Інститут гідробіології НАН України, Інститут проблем природокористування та екології НАН України, Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України, Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України).

КОСМІЧНА МЕДИЦИНА

— Дослідження остеогенезу і розробка запобіжних заходів проти остеопорозу та остеопенії

Значна увага приділяється комплексним

дослідженням феномену втрати кісткової маси в умовах мікрогравітації в космічному польоті, обумовленому максимальним дефіцитом механічного навантаження при дії малих доз радіації. Цей стан є адекватною моделлю для вивчення закономірностей розвитку остеопорозу — системного захворювання скелету, яке призводить до підвищеного ризику переломів, і сьогодні є одним з основних захворювань, обумовлених малорухливим способом життя (гілокінезією) та несприятливими екологічними факторами, і розглядається як «хвороба цивілізації». Згідно з даними Всесвітньої організації здоров'я у США з населенням 240 млн чол. остеопороз виявлено у 18.6 млн чол. Смертність від його наслідків (переломи кісток у людей похилого віку, особливо жінок) займає третє місце. Соціально-економічна значимість проблеми обумовила той факт, що у січні 2000 р. ВОЗ повідомила про початок Всесвітнього десятиріччя кісток та суглобів на 2000—2010 рр. В основі виникнення остеопоротичних змін лежать структурні та метаболічні перебудови в клітинах і міжклітинні речовині кісткової тканини, які на даний час ще залишаються маловивченими. Виявлені зміни ростових і морфогенетичних процесів в кістках в умовах мікрагравітації відображають один з механізмів розвитку остеопорозу при зниженні опорного навантаження на скелет. На підставі висунутих гіпотез щодо можливих механізмів механочутливості кісткових клітин та адаптивного ремоделювання як реакції кісткової тканини на дефіцит гравітаційного (механічного) навантаження, плануються подальші дослідження в умовах гілокінезії та космічного польоту диференціювання, метаболізму та специфічного функціонування остеогенних клітин в інтактному організмі та в культурі *in vitro*; структури та мінералізації кісткового матриксу, мікроархітектоніки кісткової тканини; стану судинно-клітинного комплексу в зонах остеогенезу та взаємодії остеогенних і кровотворних клітин; біофізичних і метаболічних кореляцій міцності кісткової тканини; ідентифікації елементів системи трансформації механічного стимулу у метаболічний сигнал тощо з метою пізнання ролі гравітації у формуванні кісткової тканини, з'ясування механізмів механочутливості кісткових клітин, розвитку остеопоротичних змін в кістках скелету; пошуків шляхів їхньої корекції за допомогою речовин, що містять кальцій (біфосфати), для корекції остеопоротичних перебудов у кістках та оцінки компенсаційно-відновлювальних процесів в організмі і в кістках скелету за специфічними показниками нейтрофілів крові з використанням цілеспрямовано розроблених методів.

— Пошук оптимальних параметрів постійного та змінного магнітних полей та режимів дії з метою корекції остеодистрофії бездіяльності.

— Визначення особливостей мікроциркуляції крові і будови судинного ендотелію.

Як було доведено у попередніх дослідженнях, порушення стану мікроциркуляції крові відіграє значну роль у погіршенні забезпечення кисневими тканинами організму людини. Згідно із сучасними уявленнями, велике значення у підтримці задовільного капілярного кровообігу належить судинному ендотелію. Оскільки саме ендотелію належить одна із провідних ролей у судинних реакціях на коливання вегетативного тонусу, від його функціонального стану в значній мірі залежить підтримка достатнього кровопостачання периферійних тканин і мозку в умовах мікрагравітації. Дуже важливим є вивчення функціонального стану ендотелію: здатності до адекватного синтезу ендотоліальних вазоактивних речовин, чутливості до гуморальних чинників, протизапальній функції ендотелію мікросудин у спокої та в умовах навантажувальних тестів (психоемоційний стрес, пасивний та активний ортостаз, гіподинамія), взаємозв'язку ендотоліальної функції з вегетативним тонусом, активністю вільнорадикального окислення у людей різного віку, визначення ролі ендотоліальної дисфункциї у порушенні мікроциркуляторного кровообігу і киснезабезпечення тканин. Отримані дані необхідні для розробки засобів корекції виявлених порушень мікроциркуляції із застосуванням препаратів, що впливають на функціональний стан ендотелію в умовах космічного польоту. Запропоновані функціональні тести з вивчення функції ендотелію є методично простими, достатньо чутливими та інформативними для використання на космічній орбітальній станції.

— Вивчення систем зідання крові та фібринолізу

Поглиблюються дослідження механізмів регуляції взаємодії компонентів систем зідання крові та фібринолізу, агрегації тромбоцитів, функціонування ендотоліальних клітин та динамічної рівноваги між активаторами та інгібіторами систем зідання крові та фібринолізу в умовах зміненої гравітації. Вивчається вплив цього фактора на стан позаклітинного матриксу ендотоліальних клітин під дією продуктів деградації фібриногену/фібрину, з'ясовується характер впливу мікрагравітації на процеси утворення і руйнування тромбів у крові людини.

— Оптимізація функціонування імунної та антиоксидантної систем людини в умовах космічного польоту.

Плануються: розробка діагностичних критеріїв

для прогнозування порушень окислювального та імунного гомеостазу як на етапах професійного добору і підготовки космонавтів, так і у післяпольотному періоді, оцінка стану систем детоксикації та формування імунних комплексів, апробація фармакологічних і немедикаментозних заходів корекції порушень імунного та антиоксидантного стану організму людини в земних умовах та на орбітальних комплексах з використанням телемедичних та супутниковых технологій і комп'ютерних діагностичних систем.

— Вивчення впливу електромагнітних випромінювань в умовах космічного польоту на основні системи життєдіяльності людини і тварин. Розробка ефективних методів реабілітації космонавтів від негативних наслідків впливу факторів космічного польоту на основі використання впливу електромагнітних випромінювань малої інтенсивності на організм.

— Обґрунтування і математична розробка алгоритму побудови психофізіологічної моделі оцінки поточної працездатності людини та структури моніторингової системи, яка реалізує цей алгоритм.

Передбачається експериментальний пошук адекватних методик показників психофізіологічного забезпечення працездатності екіпажу космонавтів, аналізу синхронізації психологічних та фізіологічних показників, критеріїв оцінки прогнозу працездатності в умовах орбітального польоту при різних рівнях шумів, вібрації та оптичного опромінення як кожного чинника окремо, так і їхнього комплексного впливу на основі з'ясування індивідуальної чутливості; експериментальна апробація розробленої системи психофізіологічного моніторингу та її корекція за результатами тестових навантажень (Інститут геронтології АМН України, Інститут урології та нефрології АМН України, Інститут медицини праці АМН України, Науковий центр радіаційної медицини АМН України, Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України, Інститут проблем кріобіології та кріомедицини НАН України, Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України).

Відповідно до програми російсько-українських експериментів на борту МКС українська сторона готове космічні експерименти «Біополімер» (Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України, Інститут урології та нефрології АМН України) та «Біосорбент» (Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України). Для проведення спільніх польотних експериментів з культурами клітин

тварин, рослин та людини, мікроорганізмами, вірусами та проростками рослин українськими спеціалістами розробляється бортовий комплекс «Біолабораторія-М» (головна установа — Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, розробник HBO «Дискові системи») для РС МКС, який забезпечує контрольовані умови культивування об'єктів і створення навантаження Ig (наявність бортової центрифуги) з ДНЦ РФ — Інститутом медико-біологічних проблем РАН, Інститутом фізіології рослин ім. К. А. Тімірязєва РАН, МДУ ім. М. В. Ломоносова, РАТ «Біопрепарат». Всього на цьому бортовому комплексі планується проведення 17 космічних експериментів, з яких першочерговими є: 1) «Вірус» (Інститут мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України), спрямований на дослідження впливу факторів космічного польоту на репродукцію аденовіrusів в епітеліальних та лімфобластoidних клітинах різної чутливості, а також спроможність лімфобластoidних клітин продукувати інтерферон та деякі інші лімфокіни, які можуть бути показником стану імунної системи людини в цих умовах, 2) «Мембрana» (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України), спрямований на дослідження структури, фізико-хімічних та функціональних властивостей біологічних мембран з використанням модельних систем в умовах мікрогравітації, також є експериментальною перевіркою гіпотези гравітаційної компенсації, 3) «Область» (Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена НАН України), спрямований на дослідження феномену втрати кісткової маси в умовах мікрогравітації — стан максимального дефіциту механічного навантаження при дії малих доз радіації та адекватна модель для з'ясування закономірностей остеопорозу, 4) «Нейрон» (Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України), спрямований на дослідження передачі нервового сигналу; ключовим етапом цього процесу є вівільнення специфічних нейромедіаторних речовин з нервових закінчень, тобто нейросекреція; саме ці дослідження є одним з шляхів розуміння виникнення морфологічних та функціональних змін у мозку людини в умовах космічного польоту, 5) «Цитосклелен» (Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України), спрямований на дослідження цитосклелету (системи фібрілярних структур білкової природи, які виконують функції опорно-рухомого апарату клітин і визначають її механічні властивості), у процесах диференціювання та функціонування клітин різного типу в умовах мікрогравітації, динаміки перебудов його актинових та тубулінових елементів, 7) «Сигнал» (Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України), спрямований на

дослідження функціонування сигнальних систем у клітинах в умовах мікрогравітації, що є основою включення зовнішніх та внутрішніх сигналів в регуляцію метаболізму та фізіологічної активності організмів. Виконавці Програми також мають широкі зв'язки з колегами із США, Німеччини, Франції, Польщі, Литви, Іспанії та ін.

З чотирьох проектів, надісланих до конкурсу ILSRA-2004 (США), проект Інституту молекулярної біології та генетики НАН України «Stability of the rhizosphere and endophytic bacterial communities associated with *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. under impact of cosmic factors» одержав позитивну наукову та технічну оцінку, і був прийнятий НКАУ до виконання з відповідним фінансуванням. Проект «The functional role of microtubule phosphorylation in plant development and environmental stimuli response» одержав грант ІНТАС. Технічна база дослідень з Програми повинилася конфокальним лазерним мікроскопом LSM 5 PASCAL та електронним трансмісійним та сканувальним мікроскопами фірми JEOL: JEM 1230 та JSM 6060 LV.

Секцією з космічної біології, біотехнології та медицини Ради з космічних досліджень НАН України розроблені пропозиції щодо наукових досліджень на поверхні Місяця і навколо місячної орбіти, основною метою яких є з'ясування особливостей біології живих систем у незвичних для них умовах та можливостей їхньої адаптації, що необхідно для розробки прийомів агротехніки на Місяці. Пропозиції базуються на: встановленнях закономірностях біологічних ефектів мікрагравітації в орбітальному польоті та ризиків пошкоджень, під впливом космічного випромінювання та на тому положенні, що адаптація в онтогенезі (оперативна адаптація) реалізується в рамках фізіологічної норми реакції на основі метаболічної та гормональної регуляції генної експресії, причому фенотипічна пластичність виявляється вже на рівні транскрипції.

1. Наукові дослідження на поверхні Місяця.

— Дослідження та оцінка адаптаційних можливостей живих систем до комплексу факторів (низкий рівень гравітації, космічне випромінювання та ін.) в умовах поверхні Місяця з використанням методу мікрокосмів:

- популяції багатоклітинних безхребетних: основний показник — співвідношення і перехід безстатевого розмноження до статевого і навпаки;
- популяції дрозофіл (*Drosophila melanogaster*): основні показники — темпи метаморфозу та старіння;
- популяції вищих рослин видів рапс та резушки; основні показники — одержання другого та на-

ступного поколінь та якість насіння;

- популяції одноклітинних зелених водоростей; основні показники — швидкість приросту біомаси і процесу старіння;
- популяції дріжджів; основні показники — швидкість розмноження та продуктивність;
- дрібних тварин (черепахи, щури та ін.); основні показники — особливості розвитку та старіння, стан кісткової тканини, закономірності втрати кісткової маси в цих умовах та перевірка засобів її запобігання; активність транспортерів нейромедіаторів в клітинах мозку.

— Екологічний моніторинг різних ділянок (материки, моря, цирки, кратери, борозни, розломи, складки) поверхні Місяця з використанням сухого насіння, культур одноклітинних водоростей у стані спокою та лишайників (після повернення на Землю активується ріст об'єктів і досліджуються швидкість росту, розмноження, наявність і вид мутацій, життезадатність тощо).

— Розробка обладнання та прийомів «місячної» агротехніки: створення демонстраційної моделі з контролюваними умовами для вирощування рослин, аналіз процесу формування штучної екосистеми, проведення хімічного та мікробіологічного аналізів місячного ґрунту; використання аналогів місячного ґрунту (силікатні мінерали) для виготовлення субстрату та живлення рослин і консорціуму конкурентних бактерій як пробіотиків для профілактики захворювань рослин; підбір сільськогосподарських культур для ведення рослинництва на Місяці у закритому ґрунті.

— Розробка технології культивування мікроводоростей і дрібних безхребетних в умовах Місяця для регенерації повітря, утилізації відходів і одержання поживної біомаси.

— Створення фітодизайну для місячної станції шляхом поєднання декоративних рослин і кольору замінника ґрунту. Підбір видового асортименту рослин, здатних функціонувати як біофільтри для покращання атмосфери станції в умовах Місяця.

— Дослідження впливу місячних умов на живі системи на клітинному та молекулярному рівнях (досліджуються клітини різного типу, кальцій- та гравізалежні процеси в клітинах, циркадні ритми, апоптоз, а також внутрішньоклітинні сигнальні процеси і можливості їхнього збалансування через застосування відповідних хімічних чинників).

— Оцінка компенсаторно-клітинних можливостей космонавтів в умовах польоту та перебування на Місяці.

2. Наукові дослідження на трасі до Місяця та навколо місячної орбіти

— Дослідження впливу польоту до і навколо

Місяця на темпи, особливості розвитку та старіння дрозофілі (*Drosophila melanogaster*);

— Дослідження молекулярних та клітинних основ функціонування мозку, його пластичності та механізмів відновлення у щурів в умовах польоту до і навколо Місяця;

— Дослідження процесу трансформації рослин за допомогою *Agrobacterium tumefaciens*.

5. Kargel J. S. Proof for water, hints of life // Science.—2994.—306, N 5702.—P. 1689—1691.
6. Kordyum E. L. Space biology and medicine in Ukraine:concepts and experimental data // Space Sciences in Ukraine 2000—2002. — Kyiv, 2002.—P. 55—66.
7. Pennisi E., Kerr R. A. On Mars, a second chance for life // Science.—2004.—305, N 5704.—P. 2010—2012.

PROSPECTS OF SPACE LIFE SCIENCES IN THE WORLD AND UKRAINE

E. L. Kordyum

Some perspective directions of space life sciences development in the world today and in future are considered. A significant attention is paid to the Space Life Sciences Program in Ukraine that is prepared in the light of world-scientific priorities in this field, based on preliminary obtained experimental materials and the original concepts and hypotheses proposed by Ukrainian scientists as well as on the use of new methodological approaches and models for ground-based and spaceflight experiments. The main directions of the Program, its tasks and scientific-technical availability are presented.

1. Кордюм Є. Л. Космічна біологія і медицина в Україні // Космічні дослідження в Україні. 1998—2000. — Київ: АДЕФ-Україна, 2001.—С. 44—54.
2. Кордюм Є. Л. Космічна біологія і медицина в Україні // Космічні дослідження в Україні. 2002—2004. — Київ, 2004.—С. 51—58.
3. Петров В. М. Радикаціональна безпосередність пілотируемої межіпланетної експедиції // Вестник РАН.—2004.—74, № 6.—С. 544—545.
4. Українські дослідження на орбітальних космічних комплексах. — Київ, 2004.—С. 16—22.

УДК [578.864+633.11]:632.938:57.043

Л. Т. Міщенко, Л. І. Остапченко, О. М. Філенко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Вплив клиностатування на стійкість пшениці до вірусної інфекції

Надійшла до редакції 04.11.04

Досліджували вплив клиностатування (вертикальне та горизонтальне) при швидкості обертання контейнерів 2 об/хв, а платформи — 1 об/хв на вірусостійкість рослин пшениці сорту Апогей. Вперше за умов модельованої мікрогравітації (клиностатування) одержано врожай зерна пшениці сорту Апогей: як неінфікованих так і інфікованих вірусом смугастої мозаїки пшениці рослин. Вперше з'ясовано характер перебігу вірусної інфекції при тривалому клиностатуванні та встановлено наявність вірусу у рослинах пшениці на 18-ту добу після інокуляції методом полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР). Найменш сприятливим варіантом досліду для репродукції вірусу виявилось вертикальне клиностатування. Збільшення вмісту загального азоту в колосках у цьому варіанті дає підставу зробити припущення про можливий синтез інтерфероноподібних білків у рослинах, подібно до того, як це відбувається у тварин.

ВСТУП

Пшениця є однією із основних культур в системах життезабезпечення космонавтів, оскільки вона важливий білковий та вітамінний компонент іжі, регенерант кисню. Тому надзвичайно актуальним при тривалих міжпланетних місяцях є здійснення онтогенезу здорових рослин пшениці протягом кількох поколінь.

В кінці ХХ століття було встановлено, що рослини можуть рости і розвиватися в умовах космічного польоту [10, 11, 13], зокрема пшениця проходить всі фази онтогенезу і дає врожай [3]. Але не виключено, що при створенні автотрофної ланки у біологічній системі життезабезпечення космонавтів стресові умови мікрогравітації можуть спричинити появу різних хвороб у рослин, особливо вірусних, які в наземних умовах залишалися в латентній формі. Оскільки дослідження взаємовідносин фітовірусів з рослинами-хазяями на Землі в умовах модельованої мікрогравітації раніше не проводилися, то їхня актуальність не викликає ніяких сумнівів.

Метою даної роботи було з'ясувати вплив клиностатування на вірусостійкість пшениці суперкарликового сорту Апогей.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Експерименти проводили на універсальному клиностаті, який реалізує декілька схем переорієнтації рослин відносно вектора прискорення сили земного тяжіння [4]. Об'єктом дослідження був вірус смугастої мозаїки пшениці (ВСМП), рід *Tritimovirus* і суперкарликова пшениця сорту Апогей (селекція США) [4]. Контрольні (нерухомі) і дослідні рослини вирощували за контролюваних умов (освітленість 15 тис. лк в режимі «день/ніч» 16/8 год при температурі 21 ± 1 °C вдень та 17 ± 1 °C вночі). Штучним субстратом (базальтове волокно) заповнювали картонні пакети розміром $7 \times 7 \times 7$ см і розміщували на дні контейнерів. В цей субстрат, зволожений дистильованою водою, висаджували по 35 штук 1-добових наклонутих проростків пшениці. У процесі вегетації рослини поливали спеціальним поживним розчином, що містить комплекс макро- і мікроелементів. Вологість субстрату становила 70—75 %. У фазі двох листків половину рослин у клиностаті і нерухомому контролі штучно інфікували ВСМП [4]. Для вірусологічних досліджень відбирали рослини протягом усього вегетаційного періоду. Для отримання урожаю зерен було залишено саму мінімальну кількість — лише по три

рослини в кожному контейнері. Репродукцію вірусу визначали методом твердофазного імуноферментного аналізу (das ELISA) [5, 12]. Загальний вміст азоту в колосках у фазу колосіння визначали за методикою К'ельдаля (напівмікрометод) [1].

Для виявлення вірусу смугастої мозаїки при штучній інокуляції рослин пшениці Апогей, вирощуваних за умов трансформованого середовища, було використано метод ревертної полімеразної ланцюгової реакції (RT-PCR).

Для виділення та очистки PolyA mRNA був застосований Sigma's Messenger RNA micro isolation kit. Виділену mRNA використовували для одержання cDNA з використанням RT-PCR-kit (Sigma) та ініціюючого праймеру — M4T (5'-GTT TTC CCA GTC ACG AC (T)₁₅-3') [9].

Одержану cDNA використовували для постановки PCR. Для цього були використані специфічні олігонуклеотидні праймери, що розглядаються в літературі як універсалні для членів родини *Potyviridae* (потівірусів) [9], а саме:

M4T (5'-GTT TTC CCA GTC ACG AC (T)₁₅-3'),

Sprimer (5'-GGX AAY AAY AGY GGX CAZ CC-3'),

X = A, G, C чи T; Y = T чи C; Z = A чи G RT-PCR

проводили, використовуючи реактиви «Sigma» (США) в термоциклері (ампліфікатор ДНК багатоканальний «Терцик», АО ДНК-технологія, Москва, 2001 р.) в режимі: 94 °C — 2 хв — перший цикл; 94 °C — 30 с, 47 °C — 1 хв, 72 °C — 2 хв — 30 циклів; 72 °C — 10 хв — заключний цикл. В PCR реакцію брали 5 мкл cDNA, по 200 мкМ кожного dNTP, 20 рМоль кожного праймера, 1U Tag DNA polymerase в 50 мкл загального об'єму.

Продукт PCR досліджували шляхом електрофорезу в 1.5 % агарозному гелі в камері для горизонтального форезу. Як маркер використовували ДНК (Sigma): 10, 8.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0; 94 °C 0.5 kb. Візуалізували гелі з допомогою High Performans Ultraviolet Transilluminator UWP, фотографували за допомогою digital camera Olympus C-3040 200M.

Статистичну оцінку вірогідності отриманих результатів проводили методом дисперсійного аналізу з використанням комп'ютерних програм Microsoft Excel та AGROSTAT.

РЕЗУЛЬТАТИ

Незаперечним підтвердженням наявності інфекції в рослинах пшениці сорту Апогей за умов клиностатування було виявлення ВСМП методом RT-PCR.

Результати, представлені на рис. 1, показують, що як в нерухомому контролі (трек 1), так і при горизонтальному (трек 2) та вертикальному клиностатуваннях (трек 3) після ампліфікації виявлено фрагмент ДНК довжиною близько 1500 нуклеотидів, що свідчить про наявність вірусу в рослинах пшениці на 18-ту добу після інокуляції, тобто в період його максимальної репродукції за даними ELISA. У здоровому нерухомому варіанті такого фрагменту немає (рис. 1, трек 4).

Оскільки нуклеотидна послідовність жодного з генів полтавського ізоляту ВСМП невідома, для полімеразної реакції нами використані праймери, що звичайно розглядаються як універсалні для членів родини *Potyviridae*. Два з них, Sprimer (5'-GGX AAY AAY AGY GGX CAZ CC-3', X = A, G, C чи T; Y = T чи C; Z = A чи G) та M4T (5'-GTT TTC CCA GTC ACG AC (T)₁₅-3'), специфічні до консервативної послідовності GNNSGQP в області Nib цистрону.

Використання праймерів M4T (5'-GTT TTC CCA GTC ACG AC (T)₁₅-3'), та Sprimer(5'-GGX AAY AAY AGY GGX CAZ CC-3'), дало змогу чітко виявити наявність продукту ампліфікації. З літературних даних відомо, що застосування цих праймерів при певних умовах ампліфікації призводить до синтезу ампліфікаційного продукту розмірами близько 1500 нуклеотидів [9]. Такий же продукт виявлений і в нашому досліді.

На рис. 2, а представлено очищений препарат ВСМП в нерухомому контролі. Віріони являють собою слабо зігнуті нитки, характерні для потівірусів. На 18-ту добу після інокуляції ВСМП клиностатуваних рослин пшениці віріони набули форму дещо зігнутої підкови (рис. 2, б).

Дослідження динаміки інфекційного процесу в рослинах пшениці сорту Апогей (весняна вегетація) показало, що при горизонтальному клиностатуванні вірус виявляється методом das-ELISA на дев'яту добу після інфікування (рис. 3), його титр становить 1/2560. Починаючи з 18-ї доби титр вірусу зменшується, а від 21-ї доби і до кінця спостереження (28—40 діб) вірус не виявляється. При вертикальному клиностатуванні вірус виявляється на дві доби пізніше, тобто на 11-ту добу. З 23-ї доби титр вірусу зменшується, а з 25-ї доби і до кінця спостереження вірус не виявляється (рис. 3).

Нами також були проведені дослідження вірулентності фітовірусу за умов клиностатування. В модельних дослідах показано, що класичний вірус тютюнової мозаїки (BTM), виділений із вірусін-фікованих рослин томатів сорту Баян, вирощених в умовах клиностатування, заражав рослини-індика-

Рис. 1. Дослідження продукту ампліфікації cDNA ВСМП з використанням праймерів M4T та Sprimer в 1.5 % агарозному гелі 1 — рослини пшениці, інфіковані ВСМП у нерухомому контролі, 2 — рослини пшениці, інфіковані ВСМП при горизонтальному клиностатуванні, 3 — рослини пшениці, інфіковані ВСМП при вертикальному клиностатуванні ($R = 1.6$), 4 — здорові рослини пшениці сорту Апогей у нерухомому контролі, 5 — маркер ДНК 10, 8.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 (kb)

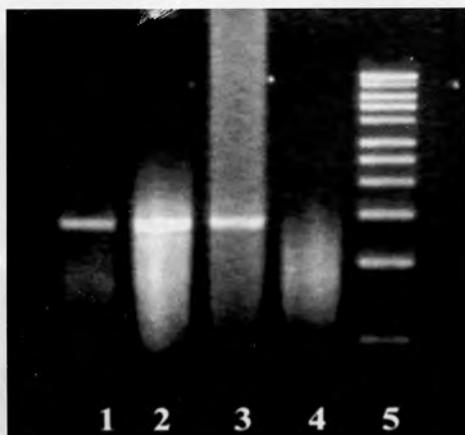
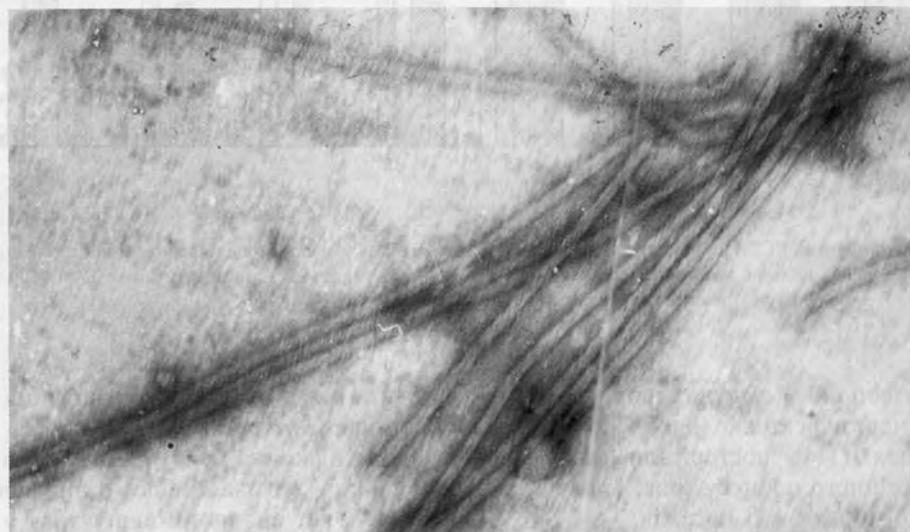
**a****б**

Рис. 2. Електронограма вірусу смугастої мозаїки пшениці, виділеного із рослин пшениці сорту Апогей: *a* — вирощених за умов нерухомого контролю, *б* — на 16-ту добу після інокуляції за умов клиностатування. Інструментальне збільшення 40000^{\times}

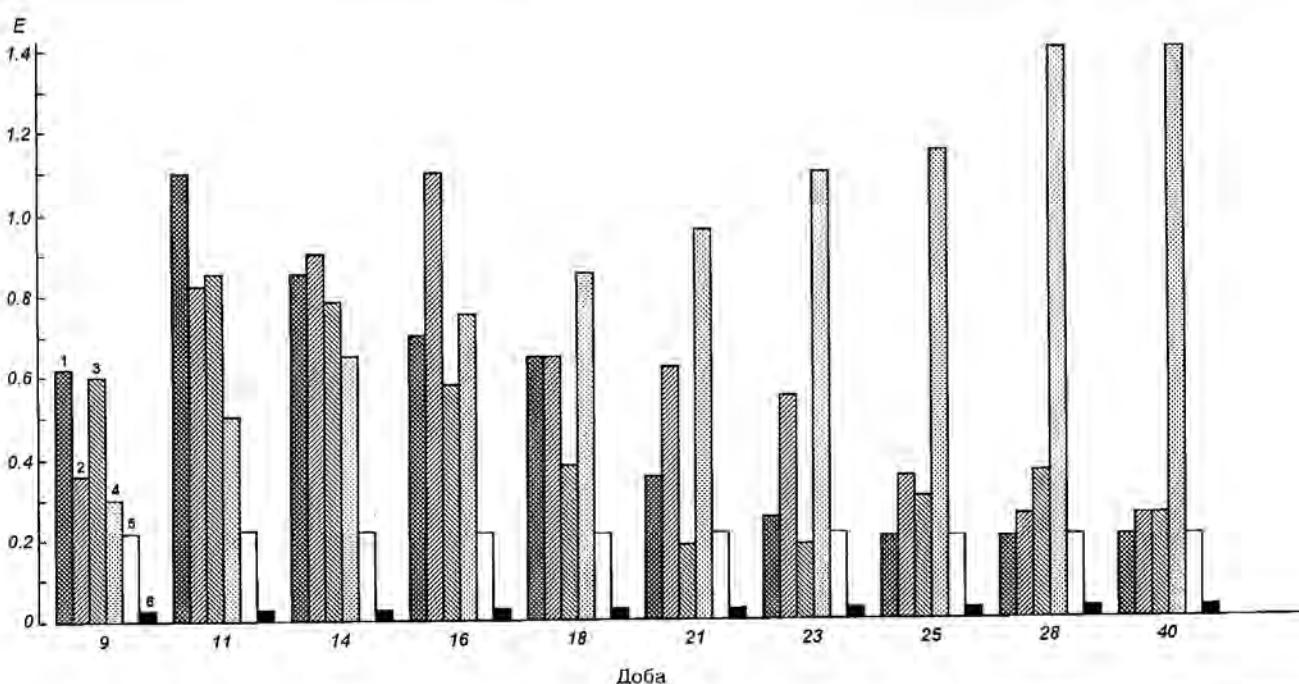


Рис. 3. Зниження репродукції ВСМП у рослин пшениці сорту Апогей в умовах модельованої мікログравітації: 1 — горизонтальне клиностатування, 2 — вертикальне клиностатування $R = 1.6$, 3 — вертикальне клиностатування $R = 1.0$, 4 — неклиностатовані рослини (контроль), 5 — безвірусні рослини (негативний контроль), 6 — НІР_{0.05}

тори тютюну *Nicotiana Tabacum* сорту Samsun з системною вірусною інфекцією (рис. 4, а). Симптоми, характерні для ВТМ, спостерігалися на тютюні в динаміці інфекційного процесу (рис. 4, б) в період осінньої вегетації протягом 3 пасажів.

Є підстава вважати, що інгібування репродукції вірусу може відбитися на продуктивності рослин. Нами вперше отримано урожай пшениці сорту Апогей в умовах модельованої мікログравітації (82 доби клиностатування). Оскільки до одержання урожаю було залишено лише по три рослини в кожному контейнері, то ми приводимо тільки його якісні зміни.

Кількість зерен у вірусінфікованих рослин при клиностатуванні значно перевищувала нерухомий контроль, хоча маса одного зерна була нижчою, ніж у нерухомому контролі. За умов клиностатування (як горизонтального так і вертикального) зросла кількість зерен відносно нерухомого контролю при зменшенні їхньої маси.

На рис. 5 показано зерна, одержані із рослин, вирощених за умов клиностатування. Різниця у зовнішньому вигляді зерен помітна навіть візуально.

Отже, клиностатування пригнічує процеси репродукції вірусу, що показано на узагальненій діаграмі (рис. 3) динаміки інфекційного процесу ВСМП. Фактично ми спостерігали деяке оздоров-

лення рослин ВСМП-інфікованої пшениці за умов клиностатування.

Дослідження вмісту загального азоту в колосках пшениці показало, що у вірусінфікованих рослин його вміст значно зменшується у нерухомому контролі, порівняно зі здоровими (таблиця).

Клиностатування здорових рослин (горизонтальне і вертикальне, $R = 1.6$) призводить до несуттєвих змін у вмісті загального азоту в колосках. Але горизонтальне клиностатування вірусінфікованих рослин знижує вміст загального азоту порівняно з нерухомими здоровими та підвищує його

Вплив клиностатування на вміст загального азоту в колосках пшениці сорту Апогей

№	Варіанти	Тип клиностатування	Загальний азот в колосках (% на кг. сух. р-ну)
1	Здорові	Нерухомий контейнер	4.74±0.02
2	Інфіковані	Нерухомий контейнер	3.31±0.02
3	Здорові	Горизонтальне	4.68±0.01
4	Інфіковані	Горизонтальне	3.95±0.01
5	Здорові	Вертикальне $R = 1.0$	4.04±0.01
6	Інфіковані	Вертикальне $R = 1.0$	4.95±0.02
7	Здорові	Вертикальне $R = 1.6$	4.88±0.03
8	Інфіковані	Вертикальне $R = 1.6$	3.94±0.02

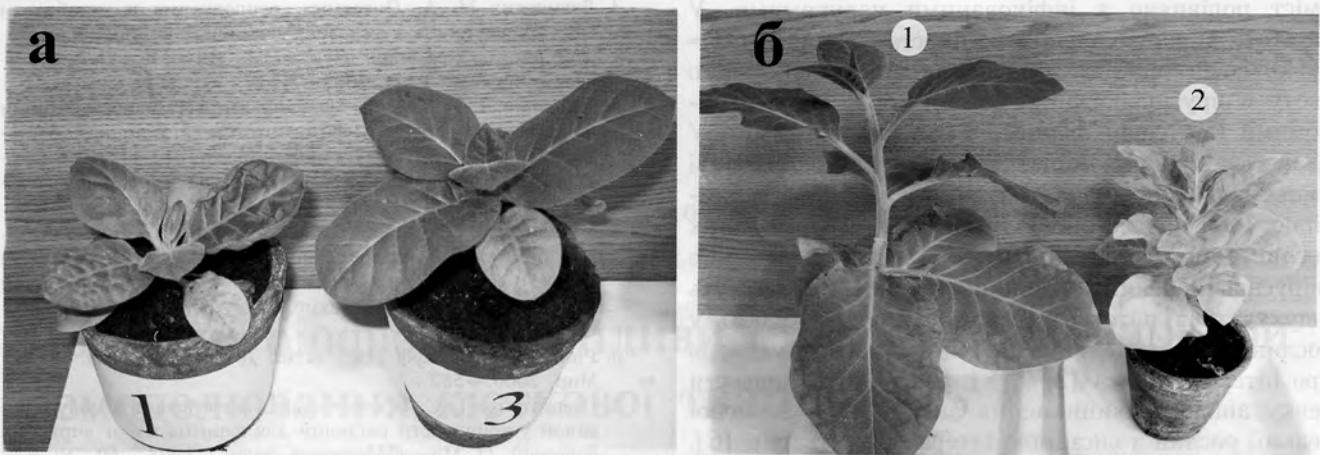


Рис. 4. Передача вірусу тютюнової мозаїки із клиностатованих рослин томатів на рослини-індикатори тютюну: а — на 18-ту добу після інокуляції (1 — інфіковані, 3 — здорові), б — на 56-ту добу після інокуляції (1 — здорові, без інфікування, 2 — інфіковані ВТМ)

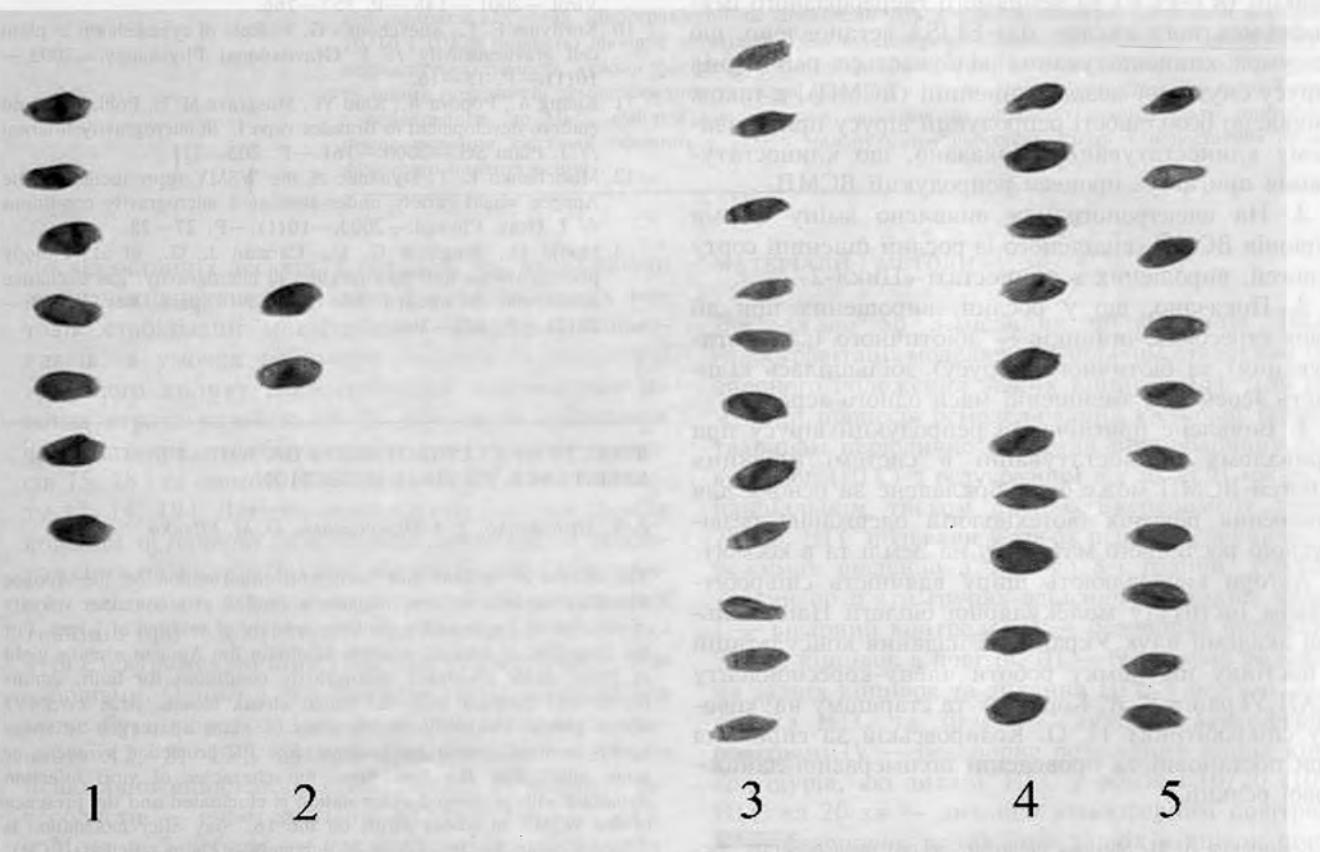


Рис. 5. Вплив умов клиностатування на урожайність зерна пшениці сорту Апогей: 1 — здорові (не інфіковані), нерухомий контроль; 2 — ВСМП-інфіковані, нерухомий контроль; 3 — ВСМП-інфіковані, горизонтальне клиностатування; 4 — ВСМП-інфіковані, вертикальне клиностатування, $R = 1.0$; 5 — ВСМП-інфіковані, вертикальне клиностатування, $R = 1.6$

вміст порівняно з інфікованими нерухомими. У варіанті з вертикальним клиностатуванням ($R = 1.0$) спостерігалось збільшення вмісту загального азоту у вірусінфікованих рослин порівняно з нерухомими (вірусінфікованими і навіть здоровими). У цьому ж варіанті виявлено найменш сприятливі умови для репродукції вірусу. Отже, цілком імовірно, що при клиностатуванні вірусінфікованих рослин, тобто при дії двох стресових чинників (вірусної інфекції та клиностатування), можуть індукуватися патоген-залежні білки (PR-білки) у рослинах пшениці, які з позицій сучасних уявлень про інтерферогенез [2, 7, 8], дозволяють провести деяку аналогію виникнення антивірусної захисної реакції рослин з системою інтерферону тварин [6].

ВИСНОВКИ

1. Методами ревертної полімеразної ланцюгової реакції (RT-PCR) та непрямого твердофазного імуноферментного аналізу das-ELISA встановлено, що за умов клиностатування відбувається реплікація вірусу смугастої мозаїки пшениці (ВСМП), а також виявлено особливості репродукції вірусу при тривалому клиностатуванні. Показано, що клиностатування пригнічує процеси репродукції ВСМП.

2. На електронограмах виявлено зміну форми віріонів ВСМП, виділеного із рослин пшениці сорту Апогей, вирощених в клиностаті «Цикл-2».

3. Показано, що у рослин, вирощених при дії двох стресових чинників — абіотичного (клиностатування) та біотичного (вірусу) збільшилась кількість зерен при зменшенні маси одного зерна.

4. Виявлене пригнічення репродукції вірусу при тривалому клиностатуванні в системі пшениця Апогей-ВСМП може бути покладене за основу для створення новітніх біотехнологій одержання безвірусного рослинного матеріалу на Землі та в космосі.

Автори висловлюють щиру вдячність співробітникам Інституту молекулярної біології Національної академії наук України за надання консультацій і постійну підтримку роботи члену-кореспонденту НАН України В. А. Кордюму та старшому науковому співробітнику Н. О. Козировській за сприяння при постановці та проведенні полімеразної ланцюгової реакції.

- Ермаков А. И. Методы биохимического исследования растений. — Л.: Колос, 1972.—456 с.
- Ладыгина М. Е., Бабоша А. В. Физиолого-биохимическая природа вирусного патогенеза устойчивости и регуляции антиинфекционной активности // Физиология растений.—1996.—43, № 5.—С. 729—742.

- Левинских М. А. Онтогенез, репродукция и метаболизм высших растений в условиях космического полета: Автoref. дис. ... д-ра биол. наук. — М.: Ин-т Медико-биологических проблем РАН, 2002.—49 с.
- Мищенко Л. Т. Влияние моделированной микротравитации на ростовые процессы и фотосинтетический аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом полосатой мозаики пшеницы // Космична наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 66—70.
- Мищенко Л. Т., Кюне Т., Мищенко И. А., Бойко А. Л. Инфекционный процесс вируса полосатой мозаики (ВСМП) в клиностатированных растениях пшеницы Апогей // Космична наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 211—215.
- Ройт А., Брестоффф Дж., Мейл Д. Иммунология. — М.: Мир, 2000.—582 с.
- Щербатенко І. С. Использование естественной и индуцированной устойчивости растений для защиты их от вирусных болезней // Мікробіологічний журнал.—1998.—60, № 6.—С. 56—65.
- Щербатенко І. С. Стійкість рослин до вірусів // Мікробіологічний журнал.—1996.—58, № 2.—С. 81—101.
- Chen J., Adams M. J. A universal PCR primer to detect members of the Potyviridae and its use to examine the taxonomic status of several members of the family // Arch. Virol.—2001.—146.—P. 757—766.
- Kordyum E. L., Shevchenko G. V. Role of cytoskeleton in plant cell gravisensitivity // J. Gravitational Physiology.—2003.—10(1).—P. 15—16.
- Kuang A., Popova A., Xiao Yi., Musgrave M. E. Pollination and embryo development in *Brassica rapa* L. in microgravity // J. Plant Sci.—2000.—161.—P. 203—211.
- Mishchenko L. T. Dynamic of the WSMV reproduction in the Apogee wheat variety under simulated microgravity conditions // J. Grav. Physiol.—2003.—10(1).—P. 27—28.
- Monje O., Bingham G. E., Carman J. G., et al. Canopy photosynthesis and transpiration in microgravity: gas exchange measurements aboard Mir // Adv. Space Res.—2000.—26(2).—P. 303—306.

EFFECTS OF CLINOROTATION ON WHEAT'S RESISTANCE TO VIRAL INFECTION

L. T. Mishchenko, L. I. Ostapchenko, O. M. Filenko

The effects of vertical and horizontal clinorotation on the Apogee wheat's resistance to viral infection studied at a container velocity of rotation of 2 rpm and a platform velocity of rotation of 1 rpm. For the first time, it became possible to obtain the Apogee wheat's yield of grain under simulated microgravity conditions for both, noninfected and infected with the wheat streak mosaic virus (WSMV) wheat plants. Evidently, the process of plant adaptation to stress agents involves certain mechanisms, like PR-protection synthesis or some other. For the first time, the character of viral infection dynamics with prolonged clinorotation is elucidated and the presence of the WSMV in wheat plants on the 18th day after inoculation is detected using the procedure of polymerase chain reaction (PCR). Vertical clinorotation proved the least suitable experimental variant for viral reproduction. Increase in total nitrogen content in spikes, which occurred in this variant, gives grounds to suggest a possibility of interferon-like protein synthesis in plants similar to that of interferon system in animals.

УДК 615.83.2:616.71-007.234

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

Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, Київ

Дозовані біофізичні впливи стабілізують маркери ремоделювання кісткової тканини при остеопенії розвантаження

Надійшла до редакції 10.10.04

Розвантаження задніх кінцівок у 56 щурів-самців 3-місячного віку викликає негативні зміни фізіологічних і біохімічних показників ремоделювання кісткової тканини, подібні до тих, що відбуваються в умовах мікрогравітації та гіпокінезії. Дія дозованої кисневої депривації в режимах 10/10 і 10/20 повністю ліквідує негативні зсуви концентрації глікозаміногліканів у сироватці крові, нормалізує активність лужної фосфатази, кислотої фосфатази, тартратрезистентної кислотої фосфатази та інших показників ремоделювання кісткової тканини у щурів. Периодичне вдихання газової суміші з редукованим до 10 % вмістом кисню може частково чи повністю компенсувати пригнічення ремоделювання кісткової тканини у осіб з малорухомим способом життя і недостатнім об'ємом фізичного навантаження.

Досвід останніх десятиріч показав, що незважаючи на інтенсивне використання фармакологічних методів стабілізації метаболізму кальцію у космонавтів, в умовах реального космічного польоту і тривалого впливу мікрогравітації відбувається істотна втрата кальцію [4, 5, 15], який забезпечує фізіологічний перебіг внутрішньоклітинних процесів [5, 18] та біомеханічні властивості кісток скелету [7, 14, 19]. Логічно продовжити пошуки засобів корекції остеопенії, викликаної відсутністю навантаження на кістки скелету, біофізичними чинниками, здатними стимулювати метаболізм кісткової тканини при недостатності притаманних цій структурі електромеханічних стимулів енергетичного метаболізму. Одним з еквівалентів таких подразників може бути короткочасна дозована киснева депривація [2, 3, 17], здатна стимулювати секрецію нещодавно виявленого стимулятора активності ос-теобластів — ендотеліальної NO-сінтази [13, 22].

Мета цієї роботи — дослідити зміни фізіологічних і біохімічних показників ремоделювання кісткової тканини в динаміці розвитку компенсаторно-пристосувальних реакцій у тварин з розвантаженням задніх кінцівок та періодичним впливом дозованої кисневої депривації (ДКД).

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Досліджено 56 3-місячних щурів-самців. Вплив мікрогравітації моделювали шляхом створення безопорного положення задніх кінцівок [3]. Для стимуляції процесів ремоделювання кісткової тканини тваринам періодично подавали нормобаричну газову суміш (НГС) з редукованим від 76 до 91 мм рт. ст. парціальним тиском кисню. Експеримент тривав 28 діб. НГС подавали у трьох різних переривчастих режимах щоденно з 24-ї до 8-ї години. Розподіл тварин по п'яти групах здійснювали таким чином: I — віварний контроль, II — безопорне положення задніх кінцівок в повітрі, III — безопорне положення задніх кінцівок та дихання НГС у режимі 20/20 (20 хв НГС та 20 хв — дихання атмосферним повітрям; IV — безопорне положення задніх кінцівок щурів, які дихали НГС у режимі 10/20 (10 хв НГС та 20 хв — дихання атмосферним повітрям); V — безопорне положення задніх кінцівок щурів, які дихали НГС у режимі 10/10 (10 хв — НГС та 10 хв дихання атмосферним повітрям).

Загальна тривалість дії дозованої кисневої депривації на тварин за 28 діб експерименту для кожного з режимів наведена у таблиці.

Тривалість впливу дозованої кисневої депривації на щурів за 28 діб безопорного положення задніх кінцівок

Номер групи	Вплив режиму, хв	Тривалість циклу, хв	Тривалість впливу ДКД, хв		Кількість циклів, н
			за 1 добу	за 28 діб	
III	20/20	40	240	6720	336
IV	10/20	30	160	4480	448
V	10/10	20	240	6720	672

Дослідження процесів ремоделювання кісткової тканини здійснювали за допомогою спектрофотометричних та імуноферментних методів, які дозволяють визначати основні показники її метаболічної активності. Визначали активність остеобластів, що формують нові елементи тканини, та остеокластів, які здійснюють її резорбцію. Для цього вимірювали в сироватці крові та кістковій тканині активність лужної фосфатази (ЛФ, КФ 3.1.3.1), загальну каталітичну активність кислої фосфатази (КФ, КФ 3.1.3.2) і тартратрезистентної кислої фосфатази (ТРКФ) стандартними наборами реактивів фірми «Лахема» (Брюн, Чехія), паратиреоїдний гормон (ПТГ) (Immunotopics, Inc, USA), концентрацію остеокальцину у сироватці крові (Quidel corporation, USA). Основні біохімічні механізми обміну колагену та протеогліканів у кістковій тканині аналізували, визначаючи такі показники: С-термінального пропептиду колагену I типу (Quidel corporation, USA). Концентрацію гліказаміногліканів (ГАГ) за методом Кляцкіна [6], гіалуронідазну активність (ГА), сумарну активність лізо-сомальних ферментів гіалуроноглюказамінідази [КФ 3.2.1.35] та гіалуронглюкуронідази [КФ 3.2.1.36] за методом П. Н. Шараєва і співробітників [16], креатиніну в крові та сечі стандартними наборами реактивів фірми «Лахема» (Брюн, Чехія), глукuronові кислоти у кістковій тканині за методом Bitter, Menir (1962) у модифікації В. К. Леонтьєва та Ю. А. Петровича [8].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У тварин, що постійно ростуть, як щури, темп приросту маси тіла відбиває загальний стан організму. Показники маси тіла у тримісячних щурів після розвантаження задніх кінцівок в атмосферному повітрі дещо відрізнялися від контрольних значень. Так, у інтактних тварин приріст маси тіла за тиждень складав близько 30 % і через 28 діб становив 124 %. У щурів з розвантаженням задніх кінцівок в атмосферному повітрі зростання маси тіла йшло повільніше і не перевищувало 15—20 %

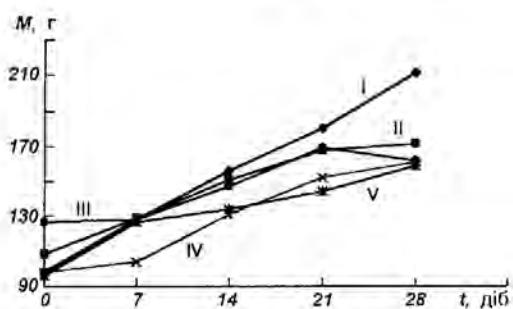


Рис. 1. Зміна маси тіла у інтактних (I) і дослідних щурів (II—V)

за тиждень. За 28 діб експерименту маса тіла тварин II групи зросла лише на 66.6 %. Ще більше уповільнювався темп приросту маси тіла у щурів з безопорним положенням задніх кінцівок, що періодично дихали НГС зі зниженим значенням P_{O_2} у різних режимах. Приріст маси тіла у щурів III групи, які у стані безопорного положення задніх кінцівок дихали НГС у режимі 20/20, у перші два тижні була однаковою: 13 % і 14.6 % відповідно, за четвертий — 25.9 %. В цілому маса тіла тварин III групи зросла на 56.9 % (рис. 1). У щурів IV групи, які дихали НГС у режимі 10/20, темп приросту маси тіла був дещо вищий. Загальне збільшення маси тіла становило 69.4 %. Маса тіла у щурів V групи (режим подачі НГС — 10/10) змінювалася нерівномірно. Темп приросту маси дорівнював 1.5 % за перший тиждень, 17—за другий, третій — 15.3 % і за четвертий тиждень знизився до 3.6 %. Загальний приріст становив 30.2 %.

Одним з класичних показників загального стану організму є маса вилкоподібної залози і відношення її до загальної маси тіла. Контроль цих показників показав, що у тримісячних щурів з розвантаженням задніх кінцівок вірогідні розбіжності відносних вагових коефіцієнтів тимуса з контролем відзначено лише для щурів IV групи, що дихали НГС зі зниженим значенням P_{O_2} у режимі 10/20 (рис. 2, а).

Аналогічне сигнальне значення має і маса наднірників.

Відносні вагові коефіцієнти наднірників вірогідно збільшувалися ($P < 0.05$) у щурів II, III, IV груп і мали лише тенденцію до збільшення у тварин V групи (рис. 2, б).

Кількість еритроцитів мала тенденцію до підвищення у щурів II, III, V груп, а у тварин IV групи вона вірогідно підвищувалася на 25.6 % ($P < 0.05$, рис. 2, в).

Концентрація гемоглобіну залишалася стабільною у щурів всіх дослідних груп.

Результати біохімічних досліджень показали, що після 28-дібового розвантаження задніх кінцівок

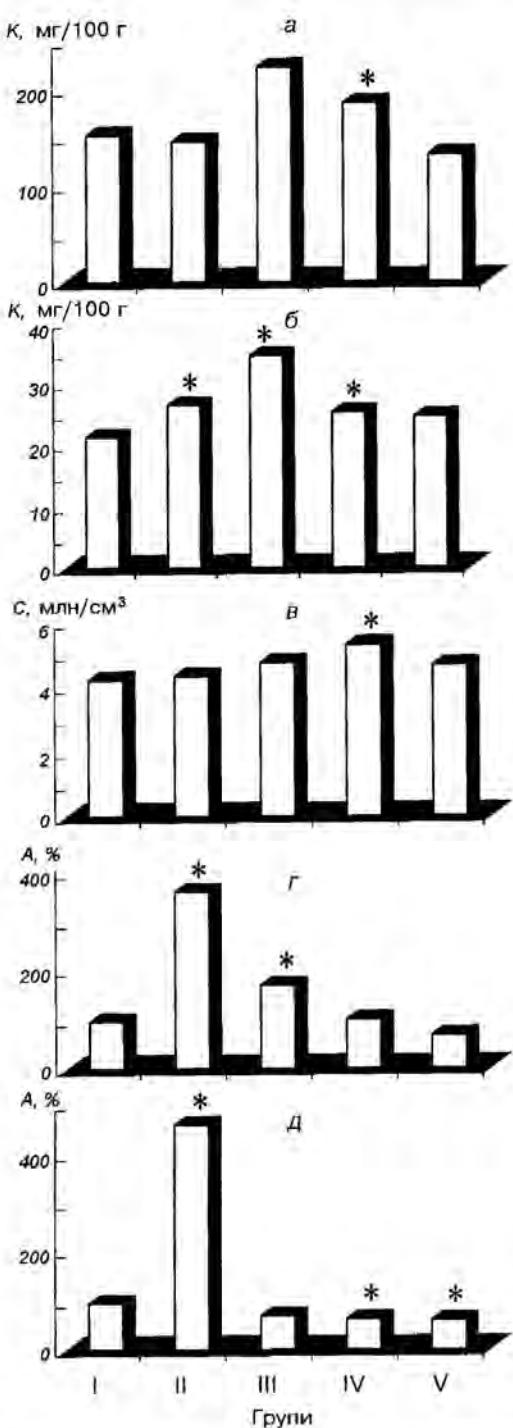


Рис. 2. Показники стану організму молодих щурів інтактної групи (І) і з розвантаженням задніх кінцівок, що дихали НГС зі зниженим P_{O_2} у різних режимах (ІІ, ІІІ, ІV, V): а, б — відносні вагові коефіцієнти (маса органу/100 г маси тіла) тимуса і наднирників відповідно, в — вміст еритроцитів у крові, г, д — активність кислот фосфатази і тартратрезистентної кислот фосфатази відповідно у сироватці крові. Зірочкою відмічено статистично вірогідні ефекти ($P < 0.05$)

щурів у атмосферному повітрі суттєво змінюється метаболізм ГАГ. У сироватці крові цих тварин концентрація ГАГ підвищилася на 53.3 % ($P < 0.05$). Дихання НГС зі зниженим P_{O_2} у всіх трьох досліджуваних режимах повністю ліквідувало негативний вплив розвантаження задніх кінцівок за цим показником.

Активність КФ і ТРКФ у сироватці крові щурів ІІ групи вірогідно збільшилася на 263.8 % і 361.6 % відповідно. ДКД у режимі 20/20 сприяла значному зниженню активності КФ у сироватці крові щурів ІІІ групи (рис. 2, г, д). Проте вона виявилась недостатньою для того, щоб отримані показники не відрізнялися від контрольних значень. Водночас режими 10/20 і 10/10 виявилися спроможними нормалізувати цей показник. Всі три досліджувані режими подачі НГС зі зниженим P_{O_2} сприяли зниженню ТРКФ у сироватці крові тварин ІІІ, ІV, V груп.

Концентрація ПТГ у сироватці крові проявляла тенденцію до підвищення у тварин всіх експериментальних груп. Вміст креатиніну в сироватці крові вірогідно зменшувався на 18—40 % у тварин ІІ, ІІІ і V груп, тоді як у щурів ІV групи підвищувався на 128.2 % ($P < 0.05$). У щурів з безопорним положенням задніх кінцівок в атмосферному повітрі посилювалася екскреція креатиніну з сечою (на 87.5 %, $P < 0.05$). НГС зі зниженим P_{O_2} , яку подавали щурам ІІ, ІV і V груп у різних режимах для дихання, сприяла незначному (на 12.5 %) зниженню виведення креатиніну з сечою.

У щурів ІІ і ІV груп спостерігали лише тенденцію до зниження активності ЛФ у сироватці крові. Максимальний ефект виявлено у тварин, що дихали НГС у режимі 10/10 (V група), де зниження було статистично вірогідним ($P < 0.05$).

Концентрація остеокальцину у сироватці крові щурів ІІ і ІІІ групи вірогідно підвищувалася на 50 % і 53.4 % ($P < 0.05$) відповідно.

Кількість С-термінальних пропептидів колагену I типу у сироватці крові тварин ІІ групи підвищилася на 65 % ($P < 0.05$), у щурів ІІІ і ІV груп вона мала тенденцію до підвищення, а у щурів V групи — до зниження відносно контрольних значень.

Активність ЛФ у кістковій тканині щурів не змінювалася у жодній з досліджуваних груп. Активність лізосомальних ферментів КФ і ГА мала тенденцію до підвищення у тварин з аксіальним розвантаженням задніх кінцівок у атмосферному повітрі. При гіпоксичному стимулюванні в режимі 10/20 активність КФ зростала на 173 % ($P < 0.05$).

Отриманий фактичний матеріал дає підстави говорити про те, що відсутність навантаження на задні кінцівки щурів ініціює встановлення нового динамічного співвідношення між процесами формування та руйнування кісткової тканини. Підвищення активності КФ і ТРКФ, концентрації ГАГ, С-термінальних пропептидів колагену I типу у сироватці крові свідчать про перевагу процесів резорбції, що зумовлює розвиток деструктивних процесів у кістковій тканині зі значними втратами кальцію та погіршенням біомеханічних властивостей кісток.

Що ж відбувається при спільній дії розвантаження та ДКД? Результати наших попередніх досліджень [1, 9–12] і наведені вище дані дають підстави стверджувати таке. ДКД діє на знижений в результаті розвантаження кісткової тканини метаболізм як стимулятор, що ініціює системні та клітинні механізми адаптації. Збільшується капілярне кровопостачання, зростає кількість еритроцитів, активується циклозис [2, 4, 22, 23]. Відомо також, що короткочасна нестача кисню викликає утворення в клітинах АР-білків та HIF-фактора, відомого індуктора широкого спектру генів-продуктів ферментів енергетичного метаболізму [20, 21, 23]. Зростає активність ферментів (КФ, ТРКФ, ЛФ), змінюється стан колагену — основного органічного компонента відновлення кісткової тканини, нормалізується вміст ГАГ.

Одним із механізмів позитивної дії ДКД може бути участь у ньому універсального регулятора життєвих процесів — оксиду азоту. Відомо, що молекулярний кисень — основний субстрат NO-синтази. Незважаючи на це, прямої залежності концентрації NO від вмісту кисню в середовищі не виявлено. Вміст NO при короткотривалому диханні газовою сумішшю з 10 % O₂ залишається незмінним. Але при цьому істотно зростає надходження Ca²⁺ в клітини, що активує ендотеліальну NO-синтазу. При тривалому впливі нестачі кисню транспорт Ca²⁺ припиняється, синтез NO гальмується, кровопостачання і метаболізм істотно знижуються. Все це — прояв патогенного впливу тривалої гіпоксії. Зовсім інша реакція виникає при короткочасній дії дозованої кисневої депривації. Навіть 1–2 хв ДКД достатньо, щоб активувати ендотеліальну NO-синтазу, розкрити резерви капіляри, збільшити вміст Ca²⁺ в клітинах і активувати їхній метаболізм. Саме цього ефекту ми домагаємося при використанні різних режимів біофізичної стимуліації клітинних структур кісткової тканини, що потерпає від нестачі вагових навантажень та супутніх електрофізіологічних стимулів регенерації. Як показали проведені досліди, у багатьох випад-

ках ДКД дозволяє зберегти кісткову тканину у близькому до фізіологічної норми стані, незважаючи на 28-добову жорстку гіпокінезію.

Порівняння різних режимів впливу ДКД свідчить, що найбільш сприятливим для кісткової тканини щура є співвідношення 10/10 та 10/20. Не виключено, що і коротші цикли виявляться достатньо ефективними, тобто пошуки оптимального режиму, що компенсуватиме вплив ДКД, потребують подальших досліджень. Разом з тим одержаний матеріал дає підстави стверджувати, що ДКД спроможна за деякими показниками — повністю, а за іншим — частково компенсувати негативні впливи аксіального розвантаження та гіпокінезії в експериментах на лабораторних тваринах. Відсутність принципових розбіжностей між енергетичним метаболізмом та регуляції процесів регенерації у хребетних надає впевненості, що принцип періодичного впливу дозованої кисневої депривації може виявитися ефективним для компенсації негативних наслідків малорухомого способу життя сучасної людини та поширення проявів остеопенії та остеопорозу у осіб різних вікових груп.

Висновки

1. Розвантаження задніх кінцівок щурів викликає негативні зміни фізіологічних і біохімічних маркерів ремоделювання кісткової тканини, аналогічно тому, що спостерігається в умовах мікрогравітації та гіпокінезії.

2. Періодичне використання дозованої кисневої депривації повністю ліквідує негативні зрушенні концентрації гліказаміногліканів у сироватці крові, нормалізує активність лужної фосфатази, кислої фосфатази, тартратрезистентної кислої фосфатази та інших показників ремоделювання кісткової тканини.

3. Порівняння різних технологій впливу дозованої кисневої депривації на щурів з розвантаженням задніх кінцівок дозволяє стверджувати, що найефективнішими за більшістю показників виявилися режими 10/10 та 10/20, які мають найбільшу кількість повторних змін рівня P_{O₂} у вдихуваному повітрі.

4. Періодична дія дозованої кисневої депривації може виявитися корисною для профілактики та лікування проявів патології кісткової тканини осіб, що ведуть малорухомий спосіб життя та мають недостатній обсяг фізичних навантажень.

1. Березовская О. П., Литовка И. Г. Остеогенез в условиях гипокинезии и гипоксии // Проблемы экологической и медицинской генетики и клинической иммунологии. Зб. наук. праць. — Кийв:

- Луганськ; Харків, 2002.—Вип. 6 (45).—С. 19—31.
2. Березовский В. А., Дайнега В. Г. Физиологические механизмы саногенных эффектов горного климата. — Киев: Наук. думка, 1988.—224 с.
 3. Березовський В. Я., Лахін П. В., Літовка І. Г. та ін. Моделювання експериментальної остеопенії та розробка технології її профілактики у шурів // Фізіол. журн.—2004.—50, № 5.—С. 88—91.
 4. Воложин А. И., Лемешкая Т. И. Изменение кальциевого и фосфорного обмена в костях и зубах при кислородном голодании // Патол. Физиология и эксперим. мед.—1970.—14, № 5.—С. 16—20.
 5. Григорьев А. И., Ларина И. М. Принципы организации обмена кальция // Успехи физиол. наук.—1992.—23, № 3.—С. 24—52.
 6. Кляцкин С. А., Лифшиц П. И. Определение гликозаминогликанов орциновым методом у больных // Лаб. дело.—1989.—№ 9.—С. 51—53.
 7. Коржуев П. А. Эволюция, гравитация, невесомость. — М.: Наука, 1971.—152 с.
 8. Леонтьев В. К., Петрович Ю. А. Биохимические методы исследования в клинической и экспериментальной стоматологии. — Омск, 1976.—93 с.
 9. Літовка І. Г. Дозированная гипоксия как фактор коррекции остеопении бездействия // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 4.—С. 81—85.
 10. Літовка І. Г., Березовська О. П. Киснева депривація як ініціатор остеогенезу при гіпокінезії // Фізіол. журн.—2003.—49, № 2.—С. 58—65.
 11. Літовка І. Г. Ремоделювання кісткової тканини у низько- і високоактивних шурів в умовах 45-добової гіпокінезії та впливу дозованої кисневої депривації // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 1.—С. 92—95.
 12. Літовка І. Г. Ремоделювання кісткової тканини шурів при гіпокінезії різної тривалості // Український медичний альманах.—2003.—6, № 2.—С. 171—174.
 13. Манухина Е. Б., Машнина С. Ю., Власова М. А. и др. Роль свободного и депонированного оксида азота в адаптации к гипоксии сердечно-сосудистой системы // Регионарное кровообращение и микроциркуляция.—2004.—3, № 11.—С. 4—11.
 14. Оганов В. С. Гипокинезия — фактор риска остеопороза // Остеопороз и остеопатия.—1998.—№ 1.—С. 13—17.
 15. Оганов В. С., Воронин Л. И., Рахманов А. С. Минеральная плотность костной ткани у космонавтов после полетов длительностью 4,5—6 месяцев на орбитальной станции «Мир» // Авиакосмическая и экологическая медицина.—1992.—№ 5/6.—С. 20—24.
 16. Шараев Н. Н., Стрелков Н. С., Гунчев В. В., Сосулина Л. Л. Определение гиалуронидазной активности в биологических жидкостях // Клинич. лаб. диагностика.—1996.—№ 3.—С. 21—22.
 17. Fukuoka P., Nishimura Y., Haruna M., Suzuki Y. Effect of bed rest immobilization on metabolic turnover of bone mineral density // Gravit. Physiol.—1997.—4, N 1.—P. S 75—S 81.
 18. Kostyuk P. G. Calcium ions in nerve cell function. — New York: Oxford Univ. Press, 1992.—220 p.
 19. Morey-Holton E. R., Arnaud S. B. Skeletal responses to spaceflight // Adv. Space Biology and Medicine.—1991.—1, N 1.—P. 37—69.
 20. Premkumar D. R. Intracellular pathways linking hypoxia to activation of c-fos and AP-1 // Adv. Exp. Med. Biol.—2000.—N 475.—P. 101—109.
 21. Semenza G. HIF-1: mediator of physiological and pathophysiological responses to hypoxia // Cell.—2000.—88, issue 4.—P. 1474—1480.
 22. Van't Hof R. J., MacPhee J., Libouban H., et al. Regulation of bone mass and bone turnover by neuronal nitric oxide synthase // Endocrinology.—2004.—145, N 11.—P. 5068—5074.
 23. Wykoff C. C., Pugh C. W., Maxwell P. H., Harris A. L. Identification of novel hypoxia dependent target genes of the von Hippel-Lindau (VHL) tumor suppressor by mRNA differential expression profiling // Oncogene.—2000.—N 19.—P. 6297—6307.

DOZED BIOPHYSICAL INFLUENCES STABILIZE THE BONE REMODELING MARKERS AFTER UNLOADED INDUCED OSTEOPENIA

V. A. Berezovskii, I. G. Litovka, A. S. Kostyuchenko

The 28-day hind limb unloading for 56 young rat-males causes negative changes of physiological and biochemical markers of the bone remodeling, like in microgravitation and hypokinesia conditions. A dozed oxygen deprivation influence in modes of 10/10 and 10/20-min eliminates completely the negative shifts in the glycosaminoglycan concentrations, normalizes the activity of the alkaline phosphatase, acid phosphatase, tartrafresistant acid phosphatase and other markers of the bone remodeling. Periodic inhalation of gas mixture with oxygen reduced to 10 % can either partially or totally compensate the oppression of bone remodeling for persons with sedentary life and insufficient volume of physical load.

УДК 57.045:576.33

Т. А. Борисова, Н. Г. Позднякова, Н. В. Крысанова, Н. Г. Гиммельрейх

Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України, Київ

ГАМК и глутамат: экзоцитоз и Na^+ -зависимое освобождение из нервных окончаний головного мозга в экстремальных условиях

Надійшла до редакції 01.07.04

Вперше показано, що гіпер gravітаційний стрес, викликаний обертанням піддослідних тварин (шурів) протягом 1 год у центрифузі великого радіуса з прискоренням 10 g, впливає на синаптичні процеси в мозку, зокрема на вивільнення $[^3\text{H}]$ ГАМК, основного гальмівного нейромедіатора, та L- $[^{14}\text{C}]$ глутамату, основного збуджуючого нейромедіатора. Досліджували вивільнення медіаторів з везикульованого та невезикульованого (цитоплазматичного) пулу нервових закінчень головного мозку шурів. Порівняльний аналіз вивільнення ГАМК та глутамату показує, що під впливом гіперgravітаційного навантаження ці процеси зазнають різних змін. Після gravітаційного навантаження вивільнення глутамату за рахунок кальцій-стимульованого процесу сквоцитозу значно зменшувалося: з 14.4 ± 0.7 % до 6.2 ± 1.9 % ($P \leq 0.05$), але істотно збільшувалося вивільнення ГАМК: з 7.2 ± 0.5 % до 11.74 ± 1.2 % ($P \leq 0.05$).

Гравитация является единственным фактором окружающей среды, который остается практически неизменным на протяжении всего эволюционного периода. В настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что длительное пребывание в условиях измененной гравитации приводит к изменениям функциональной активности многих систем в организме животных, в том числе центральной нервной системы.

В центральной нервной системе млекопитающих γ -аминомасляной кислоте (ГАМК) и L-глутамату присущи нейромедиаторные функции: взаимодействие L-глутамата со специфическим синаптическим рецептором обеспечивает передачу возбуждающих сигналов, а взаимодействие ГАМК — ингибиторных. Исследованиями последних лет показано также, что в процессе нейротрансмиссии важную модуляторную роль играет взаимодействие этих нейромедиаторных аминокислот с рецепторами нервных терминалей, которые не формируют синапсов, внесинаптическими. В результате такого взаимодействия L-глутамат может модулировать гаммаэргические процессы, и наоборот, ГАМК может влиять на интенсивность глутаматэргических процессов [17]. Сбалансированность возбуждающих и ингибирующих событий чрезвычайно важна для развития нервной системы и обеспечивает физиологическую базу для хранения информации [6].

Дисбаланс может привести к различным неблагоприятным последствиям — от судорог или нейротоксичности до депрессии центральной нервной системы.

Ключевым этапом процесса нейротрансмиссии является освобождение нейромедиатора из пресинаптической терминали, ведущее к повышению концентрации нейромедиатора в синаптической щели и активации специфических рецепторов. Основным механизмом выделения нейромедиатора из пресинапса является процесс экзоцитоза. Экзоцитоз — это сложный многостадийный процесс, в результате которого происходит слияние синаптических везикул с плазматической мембраной и освобождение содержимого везикул в синаптическую щель. Пусковым моментом экзоцитоза является повышение концентрации Ca^{2+} в пресинапсе за счет вызванной потенциалом действия активации потенциал-чувствительных Ca^{2+} каналов и входа внеклеточного Ca^{2+} . Однако, как показано недавними исследованиями, экзоцитоз не является единственным механизмом, благодаря которому нейромедиаторы могут выделяться во внеклеточное пространство. Предполагают, что значительная часть освобожденного глутамата имеет невезикулярное происхождение [8]. В этом случае освобождение нейромедиаторов не требует повышения уровня внутриклеточного Ca^{2+} и происходит за счет работы специфических транспортеров, которые локализо-

ваны в плазматической мембране пресинаптических нервных окончаний [9, 11]. Основная функция транспортеров — поддержание концентрации нейромедиатора в синаптической щели на низком уровне, однако при некоторых физиологических состояниях транспортеры могут работать в обратном направлении, перенося нейромедиатор из цитозольного пула в синаптическую щель. По-видимому, мембранные транспортеры выполняют сложные функции модуляции нейротрансмиссии.

Известно, что нарушения регуляции содержания глутамата в синаптической щели приводят к хроническому возбуждению нейрона. Глутаматергическая сверхстимуляция может разрушать нейроны. Недавно введен в обращение термин «глутаматная нейротоксичность». Причиной глутаматной нейротоксичности является связывание глутамата с его рецепторами, результатом чего является значительное массированное увеличение концентрации цитоплазматического кальция. Нарушения, возникающие в процессе поглощения и освобождения ГАМК и глутамата, могут быть вовлечены в патогенез нейродегенеративных болезней, таких как болезнь Паркинсона и болезнь Алзгеймера, шизофрения, эпилепсия и др. При мозговых травмах и ишемии также наблюдаются нарушения трансмиссии этих нейромедиаторов [5].

Целью этого исследования было изучение процессов, лежащих в основе передачи нервного импульса, у животных, которые находились в условиях измененной гравитации. Это необходимо для понимания основ синаптической пластичности. Литературные данные свидетельствуют, что как у животных, так и у людей, которые подвергались гипергравитационной перегрузке с использованием центрифуги, наблюдались изменения мозгового кровообращения и насыщения артериальной крови кислородом. Такие изменения могут быть причиной гипоксических нарушений в мозгу [7, 13–15].

Наши эксперименты были проведены на отделенных от аксонов нервных окончаний-синаптосомах, выделенных из больших полушарий головного мозга крыс дифференциальным центрифугированием и центрифугированием в градиенте плотности. Синаптосомы обладают такими характеристиками интактного нервного окончания, как мембранный потенциал, способность к активному накоплению нейромедиаторов, способность к освобождению нейромедиаторов при деполяризации мембранны. Основная задача исследования состояла в сравнительном анализе процесса освобождения $[^3\text{H}]$ ГАМК и L- $[^{14}\text{C}]$ глутамата из синаптосом, выделенных из мозга животных, пребывающих в обычных земных условиях или в условиях моделированной гравитации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гипергравитационный стресс у половозрелых самцов крыс Wistar весом 100–120 г моделировали центрифугированием с ускорением 10g (диаметр центрифуги 5 м) в специальных контейнерах в течение 1 ч. Синаптосомы из больших полушарий головного мозга крыс выделяли сразу после окончания гравитационной нагрузки. В качестве контроля использовали животных, содержащихся в обычных земных условиях.

Получение синаптосом. Синаптосомы выделяли дифференциальным центрифугированием и центрифугированием в градиенте плотности фиколла-400, применяя метод Котмана [4] с небольшими модификациями: раствор сахарозы для приготовления градиента фиколла содержал 5 мМ Нерес-NaOH и 0.2 мМ ЭДТА, pH 7.4. Синаптосомы, полученные при фракционировании в градиенте фиколла, разводили 10 объемами 0,32 М сахарозы, 5 мМ Нерес-NaOH, pH 7.4 и центрифугировали с ускорением 20000g в течение 20 мин. Осадок ресуспендировали на льду в стандартном солевом растворе следующего состава: 126 мМ NaCl, 5 мМ KCl, 2 мМ MgCl₂, 1.0 мМ NaH₂PO₄, 20 мМ Нерес, pH 7.4, 10 мМ d-глюкоза. Полученную суспензию синаптосом (концентрация белка 4 мг/мл) использовали в экспериментах в течение 2–4 ч после получения. Ca²⁺-содержащая среда состояла из стандартного солевого раствора и 2 мМ CaCl₂. Бескальциевая среда не содержала кальция, в нее добавляли 1 мМ ЭГТА. Все процедуры проводили при температуре 4 °С. Концентрацию белка определяли способом, описанным в работе [10].

Определение освобождения ГАМК и L-глутамата. Для определения уровня освобождения $[^3\text{H}]$ ГАМК и L- $[^{14}\text{C}]$ глутамата из синаптосом, суспензию (концентрация белка 4 мг/мл) в стандартном Ca²⁺-содержащем буфере преинкубировали 10 мин при $t = 37$ °С, затем добавляли 50 нМ $[^3\text{H}]$ ГАМК или 500 нМ L- $[^{14}\text{C}]$ глутамата и инкубировали еще 10 мин при $t = 37$ °С. После инкубирования с $[^3\text{H}]$ ГАМК и L- $[^{14}\text{C}]$ глутаматом суспензию разводили 10 объемами охлажденного стандартного солевого раствора, центрифугировали 10 мин с ускорением 4000g, затем осадок ресуспендировали в том же буфере при температуре 0 °С и использовали в эксперименте (концентрация белка 4 мг/мл). Суспензию синаптосом разводили стандартным Ca²⁺-содержащим буфером до концентрации белка 1 мг/мл. Освобождение $[^3\text{H}]$ ГАМК и L- $[^{14}\text{C}]$ глутамата осуществляли следующим образом: образцы (120 мкл; 25–30 мкг нагруженных синаптосом) преинкубировали 10 мин при $t = 37$ °С, добавляли деполяризующий реагент, инкубировали

6 мин и быстро осаждали в микроцентрифуге (20 с при 10000г). Аликвоты надосадка (90 мкл) и растворенного в SDS осадка смешивали со сцинтилляционной жидкостью ACS (1.5 мл) и определяли радиоактивность с помощью счетчика радиоактивности Tracor Analytic DELTA 300.

Уровень освобождения нейромедиатора выражали долей от общего содержания меченого нейромедиатора.

В экспериментах были использованы фиколл-400 (Serva), Гепес (Sigma), ЭДТА (Calbiochem), d-глюкоза (Sigma), L-глутамат (Sigma), L-[¹⁴C]-глутамат (Amersham), SDS (Fluka), NaCl, KCl, MgCl₂, NaH₂PO₄, CaCl₂ (о. с. ч. Реахим), сцинтилляционная жидкость ASC (Amersham).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали проведенные эксперименты, в результате воздействия моделированной гравитации базальное, нестимулированное освобождение нейромедиаторов [³H]ГАМК и L-[¹⁴C]глутамата из изолированных нервных окончаний не претерпевает каких-либо достоверных изменений независимо от наличия Ca²⁺ во внеклеточной среде. Так как уровень базального освобождения отражает состояние плазматической мембраны, можно полагать, что гравитационная нагрузка не приводит к изменению проницаемости плазматической мембранны.

Результатом деполяризации плазматической мембранны изолированных нервных окончаний является освобождение нейромедиаторов. Наличие или отсутствие Ca²⁺ во внеклеточной среде при деполяризации плазматической мембранны является определяющим условием того, какой механизм освобождения нейромедиаторов из синаптосом реализуется. При наличии Ca²⁺ активируется процесс экзоцитоза, слияние синаптических везикул с плазматической мембраной, в отсутствии Ca²⁺ процесс освобождение нейромедиаторов является Na⁺-зависимым и происходит посредством реверсного функционирования транспортеров нейромедиаторов, локализованных в плазматической мембране. Для определения Ca²⁺-зависимого освобождения необходимо из величины, полученной в Ca²⁺-содержащей среде, вычесть величину, полученную в бескальциевой среде, так как определенный вклад процесса Na⁺- зависимого освобождения имеет место и при наличии Ca²⁺.

На рис. 1 представлена зависимость процесса освобождения глутамата из синаптосом от времени при деполяризации синаптосом высокой концентрацией KCl (35 mM), либо блокатором K⁺-каналов 4-аминопиридином (4-АП) при наличии Ca²⁺. Как видно, процесс освобождения нейромедиатора сна-

чала прогрессивно ускоряется, а затем замедляется в течение первых нескольких минут деполяризации. Во всех дальнейших экспериментах количество освобожденного медиатора определяли за 6 мин стимуляции. Все данные приведены за вычетом базального освобождения, т. е. характеризуют только уровень стимулированного освобождения.

Было исследовано освобождение [³H]ГАМК и L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом при деполяризации плазматической мембранны 35 mM хлористым калием в бескальциевой среде, в условиях активации Na⁺-зависимого механизма освобождения нейромедиаторов. Экспериментальные данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что после пребывания животных в условиях моделированной гипергравитации статистически достоверных изменений в величинах Ca²⁺-независимого освобождения нейромедиаторов не наблюдалось. В контроле эти значения составляли 15.74±1.22 % общего содержания метки в синаптосомах для [³H]ГАМК и 7.7±2.8 % для L-[¹⁴C]глутамата, а после гипергравитационной нагрузки — 13.1±1.6 % и 12.9±2.0 % соответственно за 6 мин стимуляции. Можно предположить тенденцию к увеличению цитоплазматического пула глутамата в условиях моделированной гравитации. Не исключено, что увеличивается количество транспортеров глутамата в плазматической мембране нервных окончаний или изменяется число транспортеров нейромедиаторов, работающих в обращенном режиме.

Для того чтобы охарактеризовать Ca²⁺-независимое освобождение нейромедиаторов, деполяризацию плазматической мембранны нервных окончаний вызывали разными агентами. 4-АП вызывает исключительно зависимое от кальция освобождение ГАМК, тогда как при деполяризации высокими

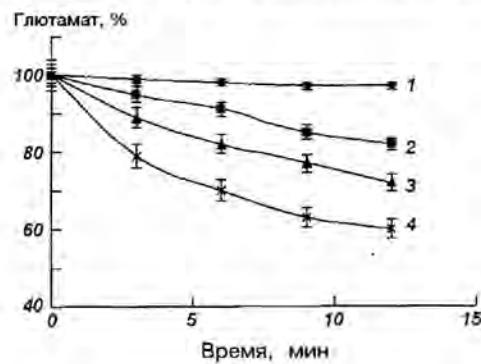


Рис. 1. Зависимость освобождения глутамата (в процентах от общего содержания метки в препарате) из синаптосом от времени в Ca²⁺-содержащей среде: 1 — освобождение глутамата не тестируется при 4 °C; 2 — базальное нестимулированное освобождение после 10 мин прединкубации при 37 °C; 3 — стимулированное 4-АП (конечная концентрация 2 мМ); 4 — стимулированное KCl (конечная концентрация 35 мМ)

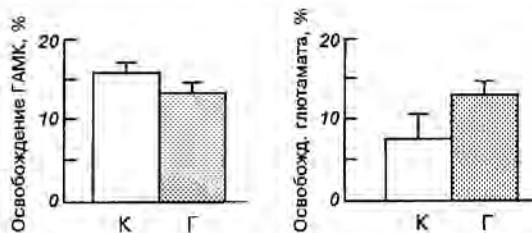


Рис. 2. Ca^{2+} -независимое, стимулированное KCl освобождение ГАМК и глутамата из синаптосом контрольных животных (К) и животных после гипергравитационной нагрузки (Г) по результатам трех независимых экспериментов

концентрациями хлористого калия в условиях кальциевой среды вклад натрий-зависимого освобождения практически равен по величине освобождению,циальному от кальция (рис. 3). В отличие от ГАМК, при деполяризации плазматической мембранны 4-AP в кальций-содержащей среде, освобождение глутамата из синаптосом происходило как посредством активации процесса экзоцитоза, так и обращения работы глутаматных транспортеров. При исследовании освобождения ГАМК использовали 4-AP, а для работы с глутаматом применяли хлористый калий.

Экзоцитоз — это молекулярный механизм, включающий вход кальция и освобождение нейромедиаторов. Изначально предполагалось, что неспецифический вход кальция является сигналом, стимулирующим секрецию нейромедиаторов. Современные гипотезы базируются на том, что не вход кальция, а его концентрация в специфических частях клетки, возможно имеющих отношение к локализации кальциевых каналов, ответственна за секрецию. Полагают, что ионные каналы не существуют как изолированные функциональные единицы, а ассоциированы с различными белками, имеющими отношение к причаливанию синаптических везикул, и формируют активную зону регуляции экзоцитоза [12]. Авторами показана существование взаимосвязь между освобождением нейромедиаторов-аминокислот и кальциевыми каналами, вовлеченными в этот процесс, кроме того, показано, что тип деполяризующего агента, открывающего канал, также играет важную роль при освобождении нейромедиаторов. Например, высокая концентрация хлористого калия приводит к входу кальция через P/Q-, N- и L-типы кальциевых каналов, а 4-AP вовлекает в процесс только P/Q- и N-типы. При этом в освобождение такого нейромедиатора как ГАМК, стимулированное 4-аминопиридином, вовлечен только P/Q-тип.

Настоящим исследованием показано, что кальций-зависимое, стимулированное 4-AP (конечная

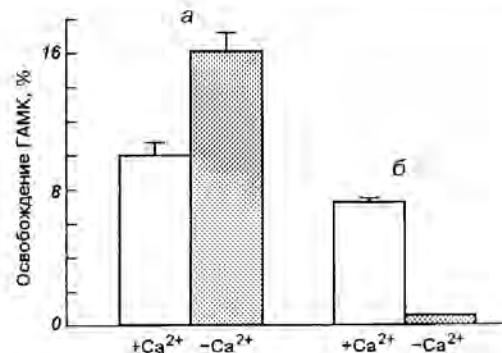


Рис. 3. Ca^{2+} -зависимое (+) и Ca^{2+} -независимое (-) освобождение $[^3\text{H}]$ ГАМК из синаптосом головного мозга крыс: а — стимулирующий агент KCl (конечная концентрация 50 мМ), б — 4-AP (конечная концентрация 2 мМ) по результатам трех независимых экспериментов

концентрация 2 мМ) освобождение $[^3\text{H}]$ ГАМК из синаптосом было значительно больше у экспериментальных животных, которые подвергались воздействию моделированной гравитации, чем контрольных. Величина кальций-зависимого компонента составляла 11.74 ± 1.2 % общего содержания метки в синаптосомах за 6 мин стимуляции, тогда как в контроле — 7.2 ± 0.54 % (рис. 4).

Исследовано освобождение L- $[^{14}\text{C}]$ глутамата из синаптосом при деполяризации плазматической мембранны 35 мМ хлористым калием в Ca^{2+} -содержащей среде. Как указывалось выше, значение Ca^{2+} -зависимого освобождения может быть получено путем вычитания величины освобождения в бескальциевой среде из данных, полученных при деполяризации в Ca^{2+} -содержащей среде. Пребывание животных в условиях моделированной гипергравитации вызывало уменьшение кальций-зависимого освобождения глутамата от 14.4 ± 0.7 % в контроле до 6.2 ± 1.9 % от общего содержания метки в препарате (рис. 4).

Нами впервые было показано, что гипергравитационный стресс влияет на процесс освобождения ГАМК и глутамата. Сравнительный анализ Ca^{2+} -зависимого освобождения ГАМК и глутамата показал, что пребывание животных в условиях моделированной гравитации вызывает противоположные изменения в передаче тормозных и возбуждающих сигналов. Как видно из вышеизложенного, после гипергравитационной нагрузки количество ГАМК, освобождающееся из нервных окончаний путем экзоцитоза, увеличивается, а глутамата — уменьшается. Изменения, которые наблюдались в стимулированном деполяризацией кальций-зависимом освобождении нейромедиаторов, коррелируют с нашими данными относительно активности транспор-

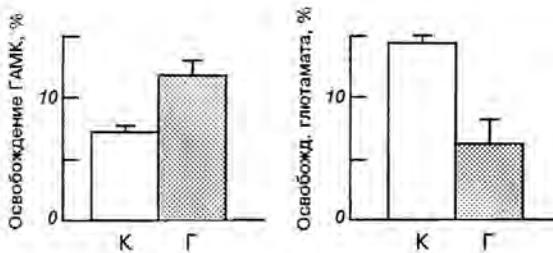


Рис. 4. Ca^{2+} -зависимое, стимулированное 4-АП и KCl, освобождение ГАМК и глутамата из синаптосом контролльных животных (К) и животных после гипергравитационной нагрузки (Г) по результатам трех независимых экспериментов

теров ГАМК и глутамата плазматической мембраны нервных окончаний [1—3]. Не исключено, что при воздействии гипергравитации, сопровождающейся развитием гипоксии мозга, модуляция функционирования транспортеров нейромедиаторов и процесса экзоцитоза в нервных окончаниях происходит посредством общих регуляторных механизмов.

Наши данные коррелируют с результатами Neurolab Spacelab Mission NASA [16], где было показано, что во время космического полета и после него, наблюдается значительные изменения в синаптических белках Synaptophysin и SNAP-25. В условиях гипергравитации также происходят изменения в морфологии синапса. Кроме того, ранее было показано, что микротрубочки — чрезвычайно гравитационно-чувствительная клеточная структура, которая модулируется в условиях измененной гравитации. Известно, что Synaptophysin, SNAP-25, микротрубочки являются неотъемлемой составляющей транспорта синаптических везикул к месту их локализации и процесса экзоцитоза.

Наши исследования позволяют оценить биохимические составляющие синаптической пластичности.

1. Borisova T. A., Krisanova N. V., Himmelreich N. H. Artificial gravity and functional plasticity of nerve system L-[¹⁴C]-glutamate uptake by nerve terminals from rat cerebellum and cerebral hemispheres under hypergravity stress // J. Grav. Physiol.—2002.—9 (1).—P. 25—P26.
2. Borisova T., Krisanova N., Himmelreich N. Na^+ -dependent glutamate efflux from rat brain synaptosomes under extremal condition // J. Grav. Physiol.—2003.—10 (1).—P. 43—44.
3. Borisova T. A., Krisanova N. V., Himmelreich N. H. Exposure of animals to artificial gravity conditions leads to the alteration of the glutamate release from rat cerebral hemispheres nerve terminals // Adv. Space Res.—2004.—33 (8).—P. 1362—1367.
4. Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions // Meth. Enzymol.—1974.—31.—P. 445—452.
5. Gegeleashvili G., Schousboe A. High affinity glutamate transporters: regulation of expression and activity // Mol. Pharmacol.—1997.—52.—P. 6—15.

6. Gonzales M., Robinson M. Neurotransmitter transporters: why dance with so many partners? // Curr. Opinion in Pharmacol.—2004.—4.—P. 30—35.
7. Guillaume A. I., Osmont D., Gaffie D., et al. Physiological implications of mechanical effects of +Gz accelerations on brain structures // Aviat. Space and Environ. Med.—2002.—73 (3).—P. 171—177.
8. Jabaudon D., Shimamoto K., Yasuda-Kamatani Y., et al. Inhibition of uptake unmasks rapid extracellular turnover of glutamate of nonvesicular origin // Proc. Natl. Acad. Sci. USA.—1999.—96.—P. 8733—8738.
9. Jensen J. B., Pickering D. S., Schousboe A. Depolarization-induced release of [³H]D-aspartate from GABAergic neurons caused by reversal of glutamate transporters // Int. J. Dev. Neurosci.—2000.—18.—P. 309—315.
10. Larson E., Howlett B., Jagendorf A. Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination // Anal. Biochem.—1986.—155.—P. 243—248.
11. Levi G., Raiteri M. Carrier-mediated release of neurotransmitters // Trends Neurosci.—1993.—16.—P. 415—419.
12. Lopez E., Oset-gasque M., Figueiro S., et al. Calcium Channel types involved in intrinsic amino acid neurotransmitters release evoked by depolarizing agents in cortical neurons // Neurochemistry International.—2001.—39.—P. 283—290.
13. Sanford G. L., Harris-Hooker S., Lui J., et al. Influence of changes in gravity on the response of lung and vascular cells to ischemia/reperfusion in vitro // J. Grav. Physiol.—1999.—6 (1).—P. 27—8.
14. Shahed A. R., Son M., Lee J. C., Werchan P. M. Expression of c-fos, c-jun and HSP70 mRNA in rat brain following high acceleration stress // J. Grav. Physiol.—1996.—3 (1).—P. 49—56.
15. Sun X. Q., Zhang L. F., Wu X. Y., Jiang S. Z. Effect of repeated +Gz exposures on energy metabolism and some ion contents in brain tissues of rats // Aviat. Space and Environ. Med.—2001.—72 (5).—P. 422—426.
16. The Neurolab Spacelab Mission: Neuroscience Research in Space // NASA SP.—2003.
17. Vizi E. S. Role of high-affinity receptors and membrane transporters in nonsynaptic communication and drug action in the central nervous system // Pharmacol. Revs.—2000.—52 (1).—P. 63—89.

GABA AND GLUTAMATE: EXOSYTOSIS AND Na^+ -DEPENDENT RELEASE FROM THE RAT BRAIN NERVE TERMINALS UNDER EXTREMAL CONDITIONS

T. A. Borisova, N. G. Pozdnyakova, N. B. Krisanova,
N. G. Himmelreich

It is demonstrated for the first time that hypergravity stress affects nerve signal transmission, in particular, the release of GABA (the most common inhibitory neurotransmitter) and L-[¹⁴C]glutamate (predominant excitatory neurotransmitter). A comparative analysis of release of GABA and glutamate from the rat brain synaptosomes (nerve terminals) shows that exposure of animals to hypergravity loading (10G for 1 hour) evokes oppositely directed alterations in inhibitory and excitatory signal transmission. Significant changes occurred in release of neurotransmitters induced by stimulating exocytosis with the agents, which depolarized nerve terminal plasma membrane. Depolarization-evoked Ca^{2+} -stimulated release was more abundant for GABA ($7.2 \pm 0.54\%$ and $11.74 \pm 1.2\%$ of total accumulated label for control and hypergravity, respectively, ($P \leq 0.05$)) and was essentially less for glutamate ($14.4 \pm 0.7\%$ and $6.2 \pm 1.9\%$, ($P \leq 0.05$)) after exposure of animals to centrifuge induced artificial gravity.

НАШІ АВТОРИ

АРТЕМЕНКО Юрій Григорович — начальник відділу Державного конструкторського бюро «Південне», лауреат Державної премії СРСР, кандидат технічних наук.

Напрям науки — розробка нових матеріалів та технологій ракетно-космічної техніки.



БЕРЕЗОВСЬКИЙ Вадим Якимович — завідувач відділу клінічної патофізіології Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, доктор медичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, кандидат медичних наук, аспірант АПГ РФ, лауреат премії ім. О. О. Богомольця. Куратор напрямку «Космічна медицина» Національного космічного агентства України.

Напрям науки — фізіологія та патологія дихання, лікувально-профілактичне використання кисневої депривації, розробка нових технологій біофізичної медицини.

БОРИСОВА Тетяна Олександрівна — науковий співробітник відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — космічна біологія, молекулярна біологія, біохімія, мембранилогія, нейрохімія.

БУРМАКА Віктор Петрович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — некогерентне розсіяння радіохвиль, хвильові процеси в іоносфері.

ГЕРАСИМЕНКО Світлана Володимирівна — молодший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика космічної плазми.

ГІММЕЛЬРЕЙХ Ніна Германівна — завідувач відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — біохімія, мембранилогія, нейрохімія, космічна біологія.

ГОЛЬДШТЕЙН Юрій Михайлович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — проектування літальних апаратів.

ГУСИНІН В'ячеслав Павлович — заступник начальника управління Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрям науки — динаміка і управління польотів.

ДОРОШКЕВИЧ Володимир Костянтинович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — проектування літальних апаратів.



ЗУБКО Віктор Петрович — начальник відділу космічних досліджень Національного космічного агентства України.

Напрям науки — дистанційні аерокосмічні дослідження, геоінформатика.

ІГНАТОВИЧ Сергій Ромуальдович — декан факультету літальних апаратів Національного авіаційного університету — Аерокосмічного інституту, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — дослідження міцності та ресурсу авіаційних та космічних конструкцій.



КЛІМЕНКО Юрій Олександрович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика твердого стану, теоретична фізика.

КОРДЮМ Єлизавета Львівна — завідувач відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, член-кореспондент НАН України, професор.

Напрям науки — клітинна біологія, ембріологія рослин, космічна біологія.

КОСТЮЧЕНКО Олександр Сергійович — інженер Інституту фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України.

Напрям науки — біохімія.



КРЕМЕНЕЦЬКИЙ Ігор Олексійович — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика космічної плазми.



МАРТИШ Євген Власович — доцент радіофізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Веде спільні роботи з Інститутом космічних досліджень НАНУ та НКАУ.

Напрям науки — фізика космічної плазми.

КРИСАНОВА Наталія Валеріївна — інженер відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України.

Напрям науки — нейрохімія, космічна біологія.

КРИШТАЛЬ Олександр Нектарійович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика космічної плазми.

КУЗНЕЦОВ Володимир Іванович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — проектування літальних апаратів.

КУЧУГУРНИЙ Юрій Петрович — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічна фізика.



ЛІСЕНКО Валерій Миколайович — заступник директора з наукової роботи Інституту юно-сфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, кандидат фізики-математичних наук.

Напрям науки — обробка випадкових сигналів, теплові процеси в юно-сфері.



ЛІТОВКА Ірина Георгіївна — старший науковий співробітник відділу клінічної патофізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — мінеральний обмін та метаболічні зміни в кістковій тканині.



МІЩЕНКО Лідія Трохимівна — старший науковий співробітник біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор біологічних наук.

Напрям науки — космічна біологія, космічна фітовірусологія, віруси рослин.

МОТИЖЕВ Сергій Володимирович — провідний науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України, доктор технічних наук.

Напрям науки — морські інформаційно-вимірювальні платформи з супутниковим зв'язком.



ОСТАПЧЕНКО Людмила Іванівна — декан біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри біохімії, доктор біологічних наук, професор. Заслужений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — біохімія, радіобіологія, космічна біологія.

ПОЗДНЯКОВА Наталія Георгіївна — науковий співробітник відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — нейрохімія.



РАДЧЕНКО Олександр Миколайович — доцент радіофізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Автор кількох популярних підручників з математичного аналізу.

Напрям науки — математична фізика та теорія випадкових полів.



СТОДІЛКА Мирослав Іванович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, кандидат фізику-математичних наук.

Напрям науки — нерівноважне перенесення випромінювання, діагностика атмосфери Сонця інверсними методами.

СЕМЕНОВ Лев Петрович — начальник відділу Національного космічного агентства України, Київ.

Напрям науки — космічні технології, космічне матеріалознавство.



СЕРДЮК Іван Іванович — начальник відділу Авіаційного науково-технічного комплексу ім. О. К. Антонова, доктор технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — аеродинаміка, динаміка польоту і керування літальних апаратів.



УРУСЬКИЙ Олег Семенович — директор департаменту Секретаріату Кабінету Міністрів України, доктор технічних наук.

Напрям науки — дослідження та створення авіаційно-космічних систем, автоматизовані системи управління.

СИДОРЕНКО Володимир Семенович — старший науковий співробітник НДЧ радіофізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Автор біля 100 наукових праць, в тому числі кількох авторських свідоцтв та патентів.

Напрям науки — прикладна електродинаміка та радіотехніка.



СТЕФАНИШИН Ярослав Іванович — заступник начальника відділу стратегічного планування Національного космічного агентства України.

Напрям науки — дистанційні аерокосмічні дослідження, радіочастотна радіометрія.



ФІЛЕНКО Ольга Михайлівна — старший науковий співробітник біологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — вірусологія, біофізика, космічна біологія.

ХАВРОШИН Віктор Фадійович — головний спеціаліст Авіаційного науково-технічного комплексу ім. О. К. Антонова.

Напрям науки — термодинаміка, системний аналіз і проектування авіаційних систем життезабезпечення.



ХЛИСТУН Олександр Іванович — доцент Національного авіаційного університету, кандидат технічних наук.

Напрям науки — математичне моделювання і регулювання робочих процесів пневматичних систем.



ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки.

Напрям науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погода.



ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика плазми, теоретична фізика.

ШАТИХІН Валерій Євгенович — начальник сектору Національного космічного агентства України, Київ.

Напрям науки — дослідження вібрацій КА, системи управління КА



ЯЦЕНКО Віталій Олексійович — провідний науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, член Вченої Ради наукового фонду вчених та спеціалістів з молекулярної кібернетики та інформатики та член Вченої Ради з присудження наукових ступенів, доктор технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, математичне моделювання фізичних процесів та керування системами з хаотичною поведінкою, космічна сенсорика.